

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Návrh a realizace regulace hladiny a teploty vody pro soustavu
vodní nádrže s volným odtokem**

**Design and implementation of level control and temperature
control in water tanks model.**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Antonín Gavlas**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy
Téma: **Návrh a realizace regulace hladiny a teploty vody pro soustavu vodní nádrže s volným odtokem**
Design and Implamentation of Level Control and Temperature Control in Water Tanks Model

Zásady pro vypracování:

Firma Ingeteam a.s. má v rámci školícího střediska k dispozici pracoviště „vodní svět“. Cílem diplomové práce je návrh, realizace a implementace regulace hladiny a teploty pro soustavu vodní nádrže s ručně regulovatelným odtokem.

Zadání:

1. Teoretický rozbor problematiky regulace hladiny a teploty. Popis řízeného modelu.
2. Návrh a realizace regulace hladiny v nádrži v zadaném pracovním bodě.
3. Návrh a realizace regulace teploty v nádrži.
4. Návrh a realizace vizualizace (WinCC) řízení soustavy.
5. Otestování implementovaných algoritmů na reálné soustavě vodní nádrže.
6. Zhodnocení, diskuze dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BERGER, Hans. *Automating with SIMATIC S7-1500: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional*. Publicis; 1st edition, 2014. ISBN-13: 978-3895784040.
[2] WILAMOWSKI, Bogdan M. a David J. IRWIN. (eds.) *Industrial Communication Systems (Electrical Engineering Handbook)*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN-13: 978-1439802816.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



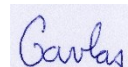
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Návrh a realizace regulace hladiny a teploty vody pro soustavu vodní nádrže s volným odtokem vypracoval samostatně. Uvedl jsem, pod vedením vedoucího bakalářské práce, všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Ostravě dne: 19. května 2015



.....
Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Jiřímu Koziorkovi, Ph.D, vedoucímu oddělení automatizace firmy Ingeteam panu Ing. Jaroslavu Tyšerovi a panu Ing. Jiřímu Kociánovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Poděkování patří i mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala a povzbuzovala.

Abstrakt

Bakalářská práce vychází z diplomové práce, která se věnuje regulaci hladiny. Na tuto skutečnost navazuje i tato práce, která ve své druhé části přidává regulaci teploty. Vše probíhá na laboratorním, respektive školícím zařízení „Vodní svět“, které je doplněno v oblastech řízení a regulace o softwarové PLC.

Základní teoretická část se věnuje regulačnímu obvodu a regulátorům. Následně popisuje laboratorní zařízení „Vodní svět“, které je umístěno ve školícím středisku firmy Ingeteam a.s. Praktická část je zaměřena, jak již bylo zmíněno, na dva typy regulací. První část se věnuje regulaci výšky hladiny a to za pomoci proporcionálního ventilu, který vhodně určuje průtok vody do nádrže. Druhá část nabízí pohled na regulaci teploty, která je realizována spínáním průtokového ohřívače. Regulace hladiny a teploty je dále vhodně zobrazena ve vizualizaci. Závěr této práce obsahuje zhodnocení naměřených výsledků a jednotlivých metod regulace.

Klíčová slova

PLC, PID regulátor, PWM regulace, proporcionální ventil, průtokový ohřívač

Abstract

Bachelor thesis is based on diploma thesis, which deals with level control. Even this work continues in this matter, but there will be added temperature control in its second part. Everything runs on laboratory, respectively training model „Water world”, which consists of added software PLC in control and regulation areas.

The fundamental theoretical part is focused on control loop and controllers. Subsequently it describes laboratory model „Water world”, which is located at training center of Ingeteam a.s. The practical part is focused on two types of control, as mentioned. The first part deals with level control with help of proportional valve, which appropriately defines water flow to the tank. The second part offers view over temperature control, which is realized by switching the flow heater. Level and temperature control will be appropriately displayed in visualization. The conclusion of this thesis contains valorisation of measured results and individual control methods.

Key words

PLC, PID controller, two - step control, proportional valve, flow heater

Seznam použitých symbolů a zkratk

DOBD	Dopředná obdélníková transformace
FBD	Function Block Diagram - Programovací jazyk (funkční bloky)
I/O	Vstupy a výstupy
LICHO	Lichoběžníková transformace
PC	Personal computer - Osobní počítač
PLC	Programmable Logic Controller - Programovatelný logický automat
Softwarové PLC	Náhrada hardwarového PLC (kapitola Programovatelný logický automat)
STL	Statement list - Programovací jazyk (textový)
Watch tabulka	Tabulka pro definování I/O v softwaru TIA portal (režim ONLINE)
ZOBD	Zpětná obdélníková transformace

Seznam obrázků

Obr. 1 - Uzavřený regulační obvod	2
Obr. 2 - Obdélníkové metody	4
Obr. 3 - Příklad PWM regulace	6
Obr. 4 - Školící zařízení „Vodní svět“	7
Obr. 5 - Pedrollo CP130	8
Obr. 6 - Průtokový ohřívač	8
Obr. 7 - Průtokoměr FLONET	9
Obr. 8 - Odporový snímač teploty	9
Obr. 9 - Tlakový snímač D2411	9
Obr. 10 - Tlakový snímač LMK	10
Obr. 11 - Elektrický pohon SQX62 a ventil RV103	10
Obr. 12 - Koncepční aplikační diagram PLC	11
Obr. 13 - Simatic ET200S	12
Obr. 14 - Zapojení sběrnice profibus na PCI kartě Simatic CP5611 A2	12
Obr. 15 - Komunikace mezi softwarovým PLC a decentrální periferií	13
Obr. 16 - Konfigurace Station manageru	13
Obr. 17 - Ovladač softwarového PLC	14
Obr. 18 - Vodní nádrž (regulovaná soustava)	17
Obr. 19 - Schéma vodní nádrže	17
Obr. 20 - PID regulátor (regulace hladiny)	19
Obr. 21 - PID regulátor (regulace teploty)	20
Obr. 22 - Regulační obvod (regulace hladiny)	21
Obr. 23 - PID regulátor výšky vodní hladiny v nádrži	22
Obr. 24 - Regulační obvod (regulace teploty)	23
Obr. 25 - Regulace teploty pomocí PID regulátoru a funkce PULSEGEN	24
Obr. 26 - Přejížděvací charakteristika teploty	25
Obr. 27 - Watch tabulka digitálních I/O průtokové ohřívače	26
Obr. 28 - Přihlašovací okno	26
Obr. 29 - Hlavní testovací okno	27
Obr. 30 - Propojení stěžejních prvků při regulaci hladiny	28
Obr. 31 - Grafická závislost výšky hladiny, otevření proporcionálního ventilu a průtoku na čase	29
Obr. 32 - Propojení stěžejních prvků při regulaci teploty	30
Obr. 33 - Grafická závislost teploty na čase	32

Seznam tabulek

Tab. 1 - Základní dynamické vlastnosti jednotlivých regulátorů	3
Tab. 2 - Přepočet parametrů	5
Tab. 3 - Výhody a nevýhody PWM	6
Tab. 4 - Technické parametry zařízení „Vodní svět“	8
Tab. 5 - Parametry modulu A ₂	14
Tab. 6 - Parametry modulu A ₃	14
Tab. 7 - Parametry modulu A ₄	15
Tab. 8 - Parametry modulu A ₅	15
Tab. 9 - Parametry modulu A ₆	15
Tab. 10 - Parametry modulu A ₇	15
Tab. 11 - Parametry modulu A ₈	15
Tab. 12 - Parametry modulu A ₉	16
Tab. 13 - Parametry modulu A ₁₀	16
Tab. 14 - Parametry modulu A ₁₁	16
Tab. 15 - Parametry modulu A ₁₂	16
Tab. 16 - Vybrané vstupy regulátoru hladiny.....	19
Tab. 17 - Vybrané vstupy regulátoru teploty	21
Tab. 18 - Komunikační parametry jednotlivých PC.....	26
Tab. 19 - Parametry stěžejních prvků při regulaci hladiny	29
Tab. 20 - Parametry stěžejních prvků při regulaci teploty	31

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Regulační obvod	2
2.1	Spojité regulátory	2
2.2	Diskrétní regulátory.....	4
2.2.1	Pulzně šířková (PWM) regulace.....	6
3.	Hardware	7
3.1	Zařízení „Vodní svět“	7
3.1.1	Jednotlivá zařízení v obvodu	8
3.2	Programovatelný logický automat	11
3.2.1	Popis a technické parametry	11
4.	Realizace obou typů regulací.....	13
4.1	Hardwarová konfigurace	13
4.1.1	Station manager.....	13
4.1.2	Ovladač softwarového PLC.....	14
4.1.3	I/O moduly decentrální periferie	14
4.2	Identifikace regulované soustavy	16
4.2.1	Matematicko - fyzikální analýza pro regulaci hladiny	17
4.3	PID regulátor	19
4.4	Regulace hladiny	21
4.5	Regulace teploty	23
4.5.1	Určení přenosu soustavy z přechodové charakteristiky	25
5.	Shrnutí dosažených výsledků	26
5.1	Vizualizace	26
5.1.1	Hlavní testovací okno.....	27
5.2	Regulace hladiny	28
5.3	Regulace teploty	30
6.	Závěr.....	33
	Literatura	34

1. Úvod

Bakalářská práce byla postupně vytvořena pod záštitou firmy Ingeteam a.s na laboratorním, respektive školícím zařízení „Vodní svět“. Toto zařízení je určeno k experimentování v oblasti řízení a ovládání. K regulaci je však potřeba další velice důležitý prvek, kterým je řídicí systém (PLC) od firmy Siemens. Ten je v této práci tvořen PCI kartou v počítači, a proto jej lze vnímat jako softwarové PLC. Celkové popisy či technické parametry jsou následně uvedeny v kapitole Hardware.

Ke školícímu zařízení „Vodní svět“ byly vytvořeny dva typy regulací. Jedná se o regulaci výšky hladiny a teploty v nádrži s volným odtokem.

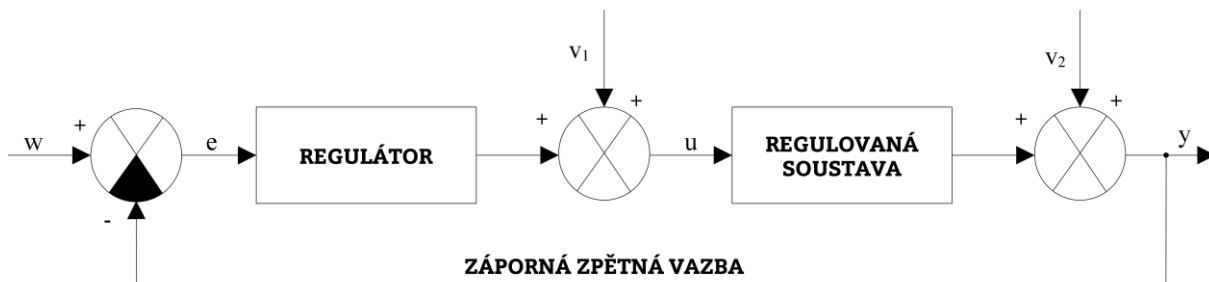
V první části, která vychází z diplomové práce [17], je popsána regulace výšky vodní hladiny. U této regulace se využívá proporcionálního ventilu, jenž zajišťuje potřebný přítok vody do nádrže. Regulátor tedy pracuje s výškou vody v nádrži, kterou si uživatel může nadefinovat. Následně propočítá potřebné otevření ventilu a při volném odtoku dojde k regulaci výšky vodní hladiny v nádrži. V kapitole Regulace hladiny je zobrazen konkrétní příklad této regulace.

Druhá část, která popisuje regulaci teploty, se zaměřuje na vlastnosti průtokového ohřívače. Tento reléový ohřívač je spínán pomocí regulátoru, jenž využívá princip tzv. PWM regulace. Již z názvu vyplývá, že se u této regulace využívá dvou mezních poloh (stavy topí a netopí), které však mohou mít rozlišnou šířku jednotlivých pulzů. Tuto problematiku dále rozvádí kapitola Pulzně šířková (PWM) regulace. Kapitola Regulace teploty následně poukazuje na konkrétní příklad této regulace.

Pro oba typy regulací byla vytvořena také vizualizace v softwaru firmy Siemens, tj. Simatic WINCC. Tato vizualizace vhodně poukazuje na regulaci hladiny a teploty. Pomocí trendů lze navíc změřit všechny potřebné charakteristiky. Jedná se primárně o grafické průběhy výšky hladiny a teploty vody v nádrži a to v závislosti na čase. Navíc lze změřit grafické závislosti prvků, mezi které patří průtokoměr, tlakoměr či proporcionální ventil. Zmíněné grafické výstupy jednotlivých prvků jsou zpracovány v kapitole Shrnutí dosažených výsledků, ve které je zmíněno i to, jak jsou důležité při regulaci výšky hladiny a teploty v nádrži. Řídicí program byl vytvořen v softwaru TIA portal. Majoritní část tohoto programu byla zpracována v jazyce FBD, který je z části doplněn i o jazyk STL.

2. Regulační obvod

Na Obr. 1 je znázorněn regulační obvod, jenž lze charakterizovat jako soubor technických prostředků, které umožňují automatické udržování vybraných veličin procesu na požadované hodnotě. Z tohoto důvodu je regulační obvod tvořen jak technickým zařízením (regulovaná soustava), tak i takovým přístrojovým vybavením, které slouží právě k automatickému udržování (regulátor v širším slova smyslu). [1]



Obr. 1 - Uzavřený regulační obvod [1]

Použité symboly:

Poruchové veličiny ... v_1, v_2

Akční veličina (Akční zásah) ... u

Požadovaná hodnota regulované veličiny (žádána hodnota) ... w

Skutečná hodnota regulované veličiny (regulovaná veličina) ... y

Regulační odchylka ... $e = w - y$

Důležitou částí regulačního obvodu je tedy regulátor, který je v této práci tvořen řídicím systémem (PLC). Regulátor lze vnímat jako systém, u kterého vede změna výstupní veličiny (akční veličina u) k odstranění regulační odchylky (e), jenž je tvořena rozdílem požadované (w) a skutečné (y) hodnoty regulované veličiny. Z toho následně vyplývají dva základní úkoly regulátoru, kterými jsou potlačení poruch v obvodu (v_1, v_2) a sledování požadovaných změn hodnot konkrétní regulované veličiny [1]. Regulátory, které hrají důležitou roli v této práci, jsou popsány v následujících kapitolách.

2.1 Spojité regulátory

U těchto regulátorů se může určitá veličina měnit v každém časovém okamžiku. Pro jednotlivé typy regulátorů jsou v Tab. 1 postupně uvedeny akční zásahy a přenosy. Následně jsou pod tabulkou shrnuty jejich elementární vlastnosti.

Regulátor	Akční zásah	Přenos v Laplaceově transformaci
P	$u = r_0 e$	$G_R(s) = r_0$
I	$u = r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$	$G_R(s) = \frac{r_{-1}}{s}$
D	$u = r_1 \frac{de}{dt}$	$G_R(s) = r_1 s$
PI	$u = r_0 e + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$	$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s}$
PD	$u = r_0 e + r_1 \frac{de}{dt}$	$G_R(s) = r_0 + r_1 s$
PID	$u = r_0 e + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de}{dt}$	$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$

Tab. 1 - Základní dynamické vlastnosti jednotlivých regulátorů [2]

Regulátor P

- V uzavřeném regulačním obvodu se vyznačuje trvalou regulační odchylkou v závislosti na typu řízeného systému
- Lze jej charakterizovat poměrně dobrými stabilními vlastnostmi

Regulátor I

- V uzavřeném regulačním obvodu se vyznačuje přechodnou regulační odchylkou
- K ustálení regulačního pochodu dojde pouze při $e(t) = 0$
- Nedodrží podmínky stability při regulaci integrační regulované soustavy

Regulátor D

- Nelze jej samostatně připojit k regulované soustavě.
- Důvodem je vstupní signál, který obsahuje derivaci regulační odchylky, přičemž z něj nelze odečíst velikost (hodnotu) regulační odchylky
- Při výskytu v kombinovaném regulátoru zlepšuje stabilitu celého regulačního obvodu.
- V případě výskytu šumu je nutné využití filtrace derivační složky

Regulátor PI

- V uzavřeném regulačním obvodu se vyznačuje odstraněním trvalé regulační odchylky, která se jinak váže k regulátoru P
- Regulační pochod z počátku charakterizuje proporcionální složka, na kterou časem navazuje složka integrační. [2]

Regulátor PD

- Zlepšuje stabilitu celého regulačního obvodu
- Regulační pochod z počátku charakterizuje derivační složka, na kterou časem navazuje složka proporcionální.
- Vyznačuje se přechodným zvýšeným zesílením

Regulátor PID

- V praxi nejrozšířenější regulátor, který kombinuje vlastnosti jednotlivých složek (P, I a D)
- Přechodový děj je v počátku charakterizován D složkou regulátoru, která zlepšuje stabilitu regulačního obvodu
- Poté je za jistý čas charakterizován I složkou regulátoru, jenž odstraňuje trvalou regulační odchylku. [2]

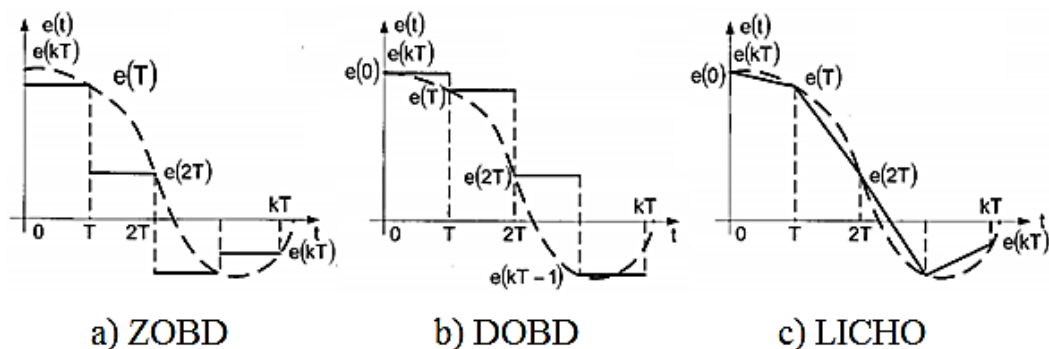
2.2 Diskrétní regulátory

Diskrétní (číslicový) regulátor se liší od spojitého tím, že vyhodnocuje informace v diskrétních časech. To lze vyjádřit rovnicí:

$$t = kT$$

kde $k \in N^+$ a T je perioda vzorkování

Je tedy možné převést spojitý PID regulátor na diskrétní (číslicový) PSD. K tomu lze využít obdélníkové metody, které jsou graficky zobrazeny na Obr. 2. [2]



Obr. 2 - Obdélníkové metody [2]

Jako příklad je uveden převod pomocí metody **ZOB**. Přenos spojitého PID regulátoru:

$$G_R(s) = k_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2.1)$$

Parametry spojitého PID regulátoru lze pomocí Tab. 2 přepočítat na parametry přírůstkového diskrétního PID regulátoru. Poté se již tyto parametry dosadí do diferenční rovnice přírůstkového algoritmu. [2]

$$u(kT) = q_0 e(kT) + q_1 e[(k-1)T] + q_2 e[(k-2)T] + u[(k-1)T] \quad (2.2)$$

Výsledný **diskrétní přenos PID regulátoru**:

$$G_R(z) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (2.3)$$

Obdobně lze odebráním jednotlivých složek vytvořit diskrétní PI a PD regulátory.

Pro diskrétní regulátor PI platí, že je přenos roven:

$$G_R(z) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (2.4)$$

U diskrétního regulátoru PD lze přenos určit jako:

$$G_R(z) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = q_0 + q_1 z^{-1} \quad (2.5)$$

Parametry Varianta	q_0	q_1	q_2
Zpětná ZOBD	$k_R \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I} \right)$	$-k_R \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right)$	$k_R \frac{T_D}{T}$
Dopředná DOBD	$k_R \left(1 + \frac{T_D}{T} \right)$	$-k_R \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} - \frac{T}{T_I} \right)$	$k_R \frac{T_D}{T}$
Lichoběžníková LICH0	$k_R \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{2T_I} \right)$	$-k_R \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} - \frac{T}{2T_I} \right)$	$k_R \frac{T_D}{T}$

Tab. 2 - Přepočet parametrů [2]

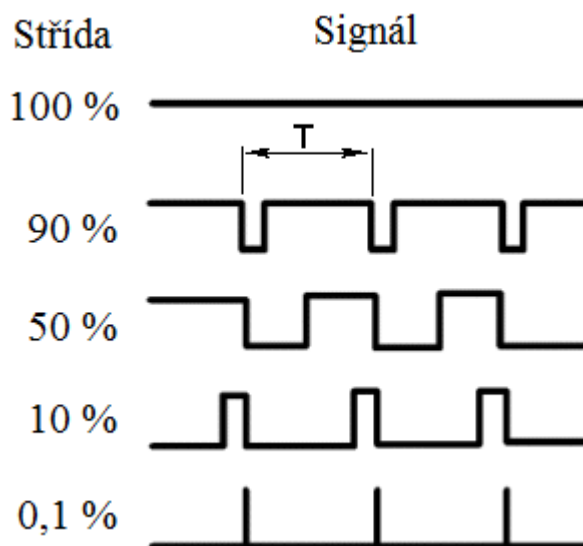
2.2.1 Pulzně šířková (PWM) regulace

Tato nespojitá, v praxi poměrně využívaná regulace se používá všude tam, kde je potřeba spínat určité zařízení ve dvou mezních polohách. Navíc je však možné, na rozdíl od dvoupolohové regulace, měnit šířku jednotlivých pulzů a tím docílit mnohem lepší kvality regulace. Hlavní výhody a nevýhody této regulace jsou přehledně uvedeny v Tab. 3.

Výhody	Nevýhody
Nenáročná pro životnost spínacích prvků	Nevhodně zvolena frekvence spínání může způsobit i zničení daného zařízení
Nízké pořizovací náklady	Spíše nenulová regulační odchylka

Tab. 3 - Výhody a nevýhody PWM

Jedna z hlavních výhod této regulace je možnost zvolení tzv. střídy. Střída je v tomto případě taková procentuální hodnota, po kterou se dané zařízení nachází v mezním stavu Zapnuto a to při celkové periodě signálu. Obr. 3 poukazuje právě na střidu signálu.



Obr. 3 - Příklad PWM regulace [3]

Jako příklad lze uvést střidu 10%. Při regulaci by tedy bylo dané zařízení ve stavu Vypnuto a to v 90% každé periody signálu (10% Zapnuto). Díky tomu lze zajistit, že se bude zařízení spínat přesně v okamžik, kdy to daná aplikace vyžaduje.

3. Hardware

3.1 Zařízení „Vodní svět“

Laboratorní zařízení „Vodní svět“, které se nachází ve školicím středisku firmy Ingeteam, je určeno k experimentování v oblasti řízení a ovládání. Název dále napovídá, že ovládaným médiem by měla být kapalina, v tomto případě voda. Po propojení zařízení s elektronickým řídicím systémem lze regulovat a ovládat průtok kapaliny pomocí čerpadla a servoventilu. Instalovaný průtokoměr a dvě nádrže s hladinoměry slouží k řízení napouštění a průtoku. Na tomto zařízení lze také sledovat změnu teploty a tlaku dané kapaliny.

Na zmíněné zařízení poukazuje Obr. 4. Nosná část zařízení je vyrobena z plastu. Na tuto část jsou poté namontovány potrubní trasy, elektrické a elektronické prvky. Mezi důležité části patří mimo jiné hlavní panel a zachytná jímka, která je rozdělena do dvou sekcí. Nad touto jímkou se nachází menší přecherčovací jímka s přepadem. Na boku jímek lze nalézt čerpadlo CP130, které do potrubních rozvodů, jenž jsou umístěny na hlavním panelu, dodává vodu. Toto čerpadlo je možné regulovat přes frekvenční měnič z PLC. V obvodu se dále nachází servoventil, průtokoměr, průtokový ohříváč, snímače teploty, tlaku či hladiny. Výstupy těchto čidel lze následně řídit a vyhodnocovat v PLC. [4]



Obr. 4 - Školící zařízení „Vodní svět“

Parametry	Hodnoty	Jednotky
Vnitřní rozměry nádrže	1976 x 488 x 685	mm
Celkové rozměry	2521 x 692 x 1957	mm
Užitný objem	0,66	m ³
Materiál zařízení	PP - H	-
Hmotnost zařízení	174,6	Kg
Celková hmotnost	834,6	Kg
Náplň	Voda	-
Maximální teplota lázně	až 60	°C
Čerpadlo	Pedrollo CP130	-
Umístění	Vnitřní	-
Datum výroby	5. 2011	-

Tab. 4 - Technické parametry zařízení „Vodní svět“ [4]

3.1.1 Jednotlivá zařízení v obvodu

Čerpadlo CP130

- Monoblokové odstředivé čerpadlo s jedním radiálním oběžným kolem lze charakterizovat výkonností, spolehlivostí, tichým chodem a jednoduchou obsluhou.
- Určeno pro čerpání čistých a mírně zakalených chemicky neagresivních kapalin

Technické parametry:

- Maximální průtok - 160 l/min
- Maximální dopravní výška - 58 m
- Maximální sací výška - 7 m
- Maximální teplota čerpaného media - 90 °C
- Maximální teplota okolí - 40 °C [5]



Obr. 5 - Pedrollo CP130 [5]

Průtokový ohřívač CLAGE

- Je určen pro tlakový provoz (hydraulicky řízen)
- ##### Technické parametry:
- Jmenovitý výkon - 6,9 kW
 - Nastavený průtok teplé vody - 3,5 l/min
 - Optimální teplota vody - 40 až 50 °C (max. 60 °C)
 - Minimální tlak k sepnutí ohřívače - 50 kPa
 - Potřebný tlak k rozepnutí ohřívače - 30 kPa [6]



Obr. 6 - Průtokový ohřívač [6]

Indukční průtokoměr FLONET

- Měření průtoku v širokém spektru elektricky vodivých kapalin
- Lze měřit v obou směrech proudění média
- Kompaktní a oddělené provedení

Technické parametry:

- Přesnost měření - $\pm 0,5\%$ pro 5 až 100% průtoku
- Teplota média - do 150 °C
- Tlak - do 40 bar
- Výstelkový materiál - měkká a tvrdá pryž, PTFE
- Různé možnosti výstupů - proudový, impulzní, frekvenční, USB, RS485 či RS232
- Stupeň krytí - IP67 [7]



Obr. 7 - Průtokoměr FLONET [7]

Odporový snímač teploty T1005

- Využití definované změny odporu v závislosti na změně teploty
- Určen k dálkovému měření teploty kapalných i plyných médií

Technické parametry:

- Čidlo snímače - měřicí odpor Pt100
- Třída přesnosti - A, B
- Měřicí rozsah - 50 až 120°C
- Maximální měřicí proud - 3 mA (doporučený ≤ 1 mA)
- Výstupní signál - bez převodníku (odporový), s převodníkem linearizovaný (4 až 20 mA) [8]



Obr. 8 - Odporový snímač teploty

Tlakový snímač D2411

- Určen pro měření relativního a absolutního tlaku kapalin, plynů a par (pro statické i dynamické měření)

Technické parametry:

- Rozsah tlaků - 0,1 až 4 MPa
- Rozsah teplot měřeného média - -25 až 125 °C
- Rozsah teplot okolí - -25 až 85 °C
- Přesnost - $\pm 0,5$ až 1 %
- Rychlost vzorkování - 1000 měření /s [9]



Obr. 9 - Tlakový snímač D2411 [9]

Tlakový snímač LMK 351

- Využití pro procesní měřicí techniku a měření výšky hladiny
- Technické parametry:
- Rozsah tlaků - 0 až 4 kPa, případně 0 až 2 MPa
 - Přesnost - $\leq 0,35 \%$
 - Výstupní signály - 2vodič (4 až 20 mA) a 3vodič (0 až 20 mA) [10]



Obr. 10 - Tlakový snímač LMK [10]

Elektrický pohon SQX62

- Vyznačuje se elektromotorickým pohonem s bezúdržbovou konstrukcí
 - Určen k ovládání přímých a trojcestných ventilů
- Technické parametry:
- Napájecí napětí - AC 24V
 - Řízení pomocí signálů - DC 0 až 10 V nebo 4 až 20 mA
 - Jmenovitý zdvih - 20 mm
 - Stupeň krytí - IP54



Obr. 11 - Elektrický pohon SQX62 a ventil RV103

Elektrický pohon SQX62 se využívá ve spojení s ventilem RV103. Toto uskupení je vyznačeno na Obr. 11. Pohon SQX62 se navíc vyznačuje, oproti ventilu RV103, dvakrát větším jmenovitým zdvihem, a proto je nutné přepočítat skutečnou polohu ventilu. Přepočet je znázorněn v následujících rovnicích. [11]

$$QW512 = \frac{\text{poloha}_{\text{nastavena}}}{2} + 13824$$
$$\text{poloha}_{\text{skutečna}} = \frac{IW522 - 13824}{2}$$

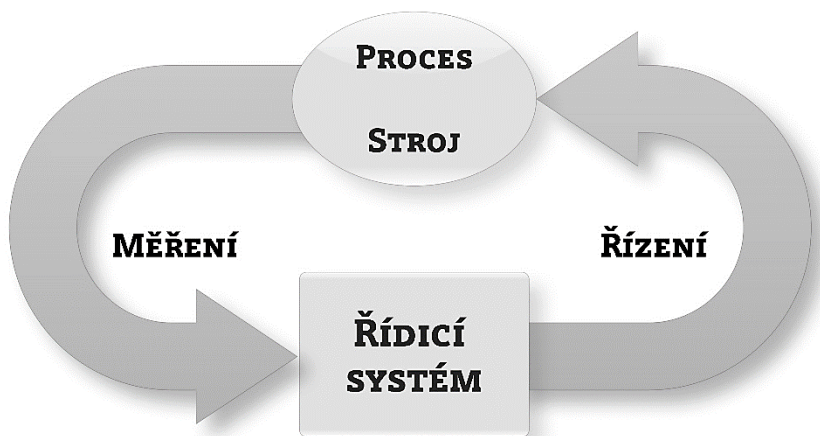
Použité symboly:

Vstup regulačního ventilu ... IW522

Požadovaná hodnota ventilu ... QW512

3.2 Programovatelný logický automat

Programovatelný logický automat (PLC) patří mezi takové počítače, které využívají integrované obvody uvnitř elektronických zařízení k implementaci řídicích funkcí. Tyto programovatelné logické automaty shromažďují instrukce, mezi které patří sekvence, časování, počítání, aritmetické operace, manipulace s daty či komunikace a s jejich pomocí jsou schopny řídit průmyslové stroje a procesy. Cyklus PLC je zobrazen na Obr. 12. [12]



Obr. 12 - Konceptní aplikační diagram PLC [12]

3.2.1 Popis a technické parametry

Tato práce byla realizována na softwarovém PLC od firmy Siemens, které neobsahuje žádné I/O moduly. K tomuto PLC byla proto připojena, přes průmyslovou sběrnici profibus, vzdálená decentrální periferie. Následující odstavce popisují jak použité PLC, tak i zmíněnou decentrální periferii.

Softwarové PLC WinAC RTX

Softwarové PLC je v této práci tvořeno PCI kartou Simatic CP5611 A2, kterou je možné připojit do počítače. Mezi hlavní výhody této karty patří jednoduchá instalace nebo komunikace s periferiemi přes průmyslovou sběrnici PROFIBUS. [13]

Decentrální periferie SIMATIC ET 200S

Decentrální periferie je multifunkční, vysoce modulární I/O systém. Stupeň krytí odpovídá normované ochraně IP20, která je vhodná pro automatizační procesy. Tato periferie může obsahovat až 63 I/O modulů. V této práci je zapojeno 11 modulů. Prvních 9 je tvořeno digitálními a analogovými I/O, které jsou doplněny o 2 napájecí moduly. Decentrální periferie je následně zobrazena na Obr. 13 [14]

Hlavní výhody

- Úspora místa v rozvaděči
- Integrovaná pomocná sběrnice
- Permanentní připojení kabelů a tedy i možná výměna modulů za chodu
- Integrované bezpečnostní moduly [15]



Obr. 13 - Simatic ET200S

Průmyslová sběrnice profibus

Na zapojení průmyslové sběrnice profibus, která je připojena do PCI karty Simatic CP5611 A2, poukazuje Obr. 14.

Hlavní parametry

- Nejrozšířenější sběrnice systém
- Přenosovým médiem může být stíněná kroucená dvoulinka (RS485), případně optický kabel (skleněná či plastová vlákna)
- Maximální přenosová rychlost je 12Mbit/s
- Pro nižší až střední rozsah komunikační výkonosti [16]



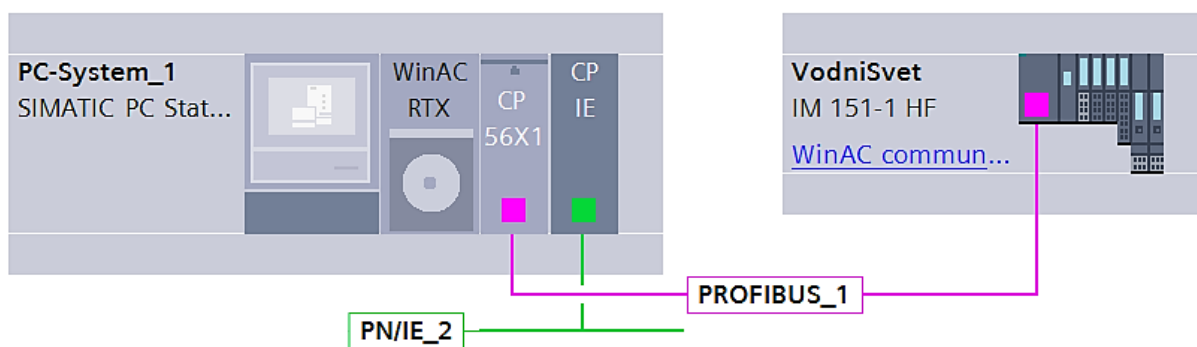
Obr. 14 - Zapojení sběrnice profibus na PCI kartě Simatic CP5611 A2

4. Realizace obou typů regulací

Pro korektní funkčnost regulace hladiny a teploty v nádrži s volným odtokem je nutné, aby dostupný hardware správně komunikoval s uživatelem. Proto se musí z počátku jasně definovat hardwarová konfigurace, jenž je popsána v této kapitole.

4.1 Hardwarová konfigurace

V kapitole Popis a technické parametry byl zpracován teoretický rozbor dostupného hardwaru. Jedná se tedy o softwarové PLC WinAC RTX, které ovšem neobsahuje žádné I/O moduly k tomu, aby byla tato práce vůbec realizovatelná. Proto se navíc využívá decentralní periferie Simatic ET200S. Komunikaci mezi softwarovým PLC a decentralní periferií zajišťuje průmyslová sběrnice profibus. Navíc se v této konfiguraci objevuje i sběrnice profinet, která popsána v následující kapitole. Komunikace je zobrazena na Obr. 15.



Obr. 15 - Komunikace mezi softwarovým PLC a decentralní periferií

4.1.1 Station manager

Station manager zajišťuje komunikaci mezi softwarovým PLC a softwarem, ve kterém je tato úloha naprogramována, tj. TIA portal. Na tuto skutečnost poukazuje Obr. 16. Je zřejmé, že se prvek softwarového PLC (WinLC RTX) nachází na druhém indexu. Třetí index poté tvoří prvek IE General, který charakterizuje profinetovou sběrnici.

Station: <input type="text" value="PLC"/>		Mode: <input type="text" value="RUN_P"/>				
Index	Name	Type	Ring	Status	Run/Stop	Conn
1						
2	WinLC RTX	WinLC RTX				
3	IE General	IE General				
4						

Obr. 16 - Konfigurace Station manageru

4.1.2 Ovladač softwarového PLC

Softwarové PLC je nutné ovládat pomocí vhodného ovladače. Konkrétně se jedná o WinAC RTX 2010, jenž se nachází na Obr. 17. Tento ovladač zobrazuje, v reálném čase, aktuální stav CPU a případně indikuje jednotlivé poruchy. Například se může jednat o EXTf, který by v případě špatné komunikace s decentralní periferií indikoval poruchu. Tlačítka RUN (spuštění CPU) a STOP (zastavení CPU) jsou společně s MRES (paměťový RESET) základními ovládacími prvky.



Obr. 17 - Ovladač softwarového PLC

4.1.3 I/O moduly decentralní periferie

V následujících tabulkách jsou uvedeny konkrétní parametry jednotlivých modulů decentralní periferie. Jedná se o I/O, které využívá softwarové PLC ke komunikaci se zařízením „Vodní svět“.

Modul A₂

Zdroj PM-E 24 to 48VDC_1
(24-48)V, 10A

Tab. 5 - Parametry modulu A₂

Modul A₃

Digitální vstupy 4DI x 24VDC ST_1	
Adresa vstupu	Popis
I0.0	Průtokoměr - relé výstup
I0.1	Průtokoměr - výstup 1
I0.2	Průtokoměr - výstup 2
I0.3	Průtokový ohříváč - režim ohřívání

Tab. 6 - Parametry modulu A₃

Modul A₄

Digitální vstupy 4DI x 24VDC ST_2	
Adresa vstupu	Popis
I1.0	Stav napájení průtokového ohřívače
I1.1	Oběhové čerpadlo - režim čerpání
I1.2	Stav napájení oběhového čerpadla
I1.3	-

Tab. 7 - Parametry modulu A₄**Modul A₅**

Digitální výstupy 2DO x 24VDC / 0.5A ST_1	
Adresa výstupu	Popis
Q0.0	Průtokový ohřívač - ohřívání
Q0.1	Oběhové čerpadlo - čerpání

Tab. 8 - Parametry modulu A₅**Modul A₆**

Zdroj PM-E 24 to 48VDC_2
(24-48)V, 10A

Tab. 9 - Parametry modulu A₆**Modul A₇**

Analogové vstupy 2AI x I 2/4 WIRE HF_1	
Adresa vstupu	Popis
PIW512	Snímač tlaku - P ₁
PIW514	Snímač tlaku - P ₂

Tab. 10 - Parametry modulu A₇**Modul A₈**

Analogové vstupy 2AI x I 2/4 WIRE HF_2	
Adresa vstupu	Popis
PIW516	Snímač výšky hladiny - L ₁
PIW518	Snímač výšky hladiny - L ₂

Tab. 11 - Parametry modulu A₈

Modul A₉

Analogové vstupy 2AI x I 2/4 WIRE HF_3	
Adresa vstupu	Popis
PIW520	Vstup průtokoměru
PIW522	Vstup regulačního ventilu

Tab. 12 - Parametry modulu A₉

Modul A₁₀

Analogové vstupy 2AI x I 2/4 WIRE HF_4	
Adresa vstupu	Popis
PIW524	Teplota za průtokovým ohřívačem- T ₃
PIW526	-

Tab. 13 - Parametry modulu A₁₀

Modul A₁₁

Analogové vstupy 2/4AI x RTD ST_1	
Adresa vstupu	Popis
PIW528	Teplota ve vodní nádrži - T ₁
PIW530	Teplota ve vodní nádrži - T ₂

Tab. 14 - Parametry modulu A₁₁

Modul A₁₂

Analogové výstupy 2AO XI ST_1	
Adresa výstupu	Popis
PQW512	Požadovaná hodnota ventilu
PQW514	-

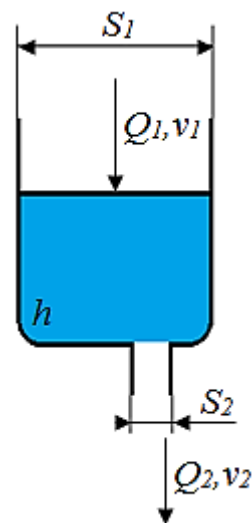
Tab. 15 - Parametry modulu A₁₂

4.2 Identifikace regulované soustavy

Za regulovanou soustavu lze považovat vodní nádrž, která je znázorněna v reálném provedení na Obr. 18 a schematicky na Obr. 19. Regulovat jednotlivé veličiny lze v této nádrži pouze tehdy, pokud bude zaručen volný odtok. Ten je tvořen dvěma ručními ventily s diferenčními průměry, z nichž se užší ventil (doladovací výtokový prvek) využívá u obou typů regulací. [17]



Obr. 18 - Vodní nádrž (regulovaná soustava)



Obr. 19 - Schéma vodní nádrže [17]

Plocha nádrže pro přítok (S_1)

Čtvercová plocha o rozměrech $0,23 \times 0,45$ [m]

Objemový průtok (Q_1)

Průtok vody do nádrže, který lze nastavit na požadovanou hodnotu pomocí proporcionálního ventilu a odečíst z průtokoměru.

Rychlost přítoku (v_1)

Plocha nádrže pro odtok (S_2)

Kruhová plocha, kterou lze změnit pomocí již zmíněných ručních ventilů. Průměr potrubí je $0,04$ m.

Objemový průtok (Q_2)

Průtok vody z nádrže.

Rychlost výtoku (v_2)

Výška hladiny v nádrži (h)

Měření výšky hladiny zajišťuje hladinoměr (na dně nádrže).

4.2.1 Matematicko - fyzikální analýza pro regulaci hladiny

Tato analýza vychází ze schématu na Obr. 19. Regulovanou soustavu, respektive vodní nádrž s volným odtokem charakterizují následující fyzikální vztahy [18].

Rovnice kontinuity je charakterizována:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (4.1)$$

Bernoulliho rovnice poté vyjadřuje rychlost výtoku dané kapaliny:

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (4.2)$$

Rychlost přítoku lze následně definovat:

$$v_1 = \frac{\Delta h}{\Delta t} = h'(t) \quad (4.3)$$

Pro změnu výšky hladiny platí:

$$S_1 v_1 = Q_1 - Q_2 \quad (4.4)$$

V této rovnici je objemový průtok (Q_2) definován:

$$Q_2 = S_2 v_2 = S_2 \sqrt{2gh} \quad (4.5)$$

Dosazením rychlosti přítoku a objemového průtok (Q_2):

$$S_1 h'(t) = Q_1 - S_2 \sqrt{2gh}$$

Lze po matematické úpravě:

$$h'(t) = \frac{Q_1}{S_1} - \frac{S_2}{S_1} \sqrt{2gh}$$

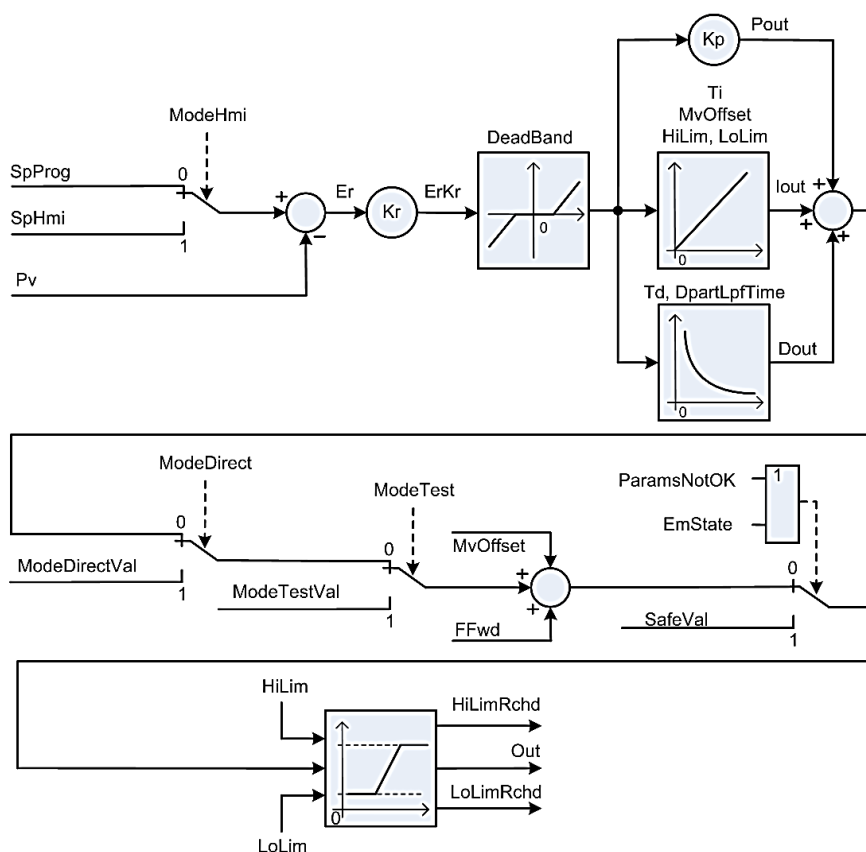
Dojít k výsledné diferenciální rovnici:

$$\underline{\underline{h'(t) = \frac{1}{S_1} \left(Q_1(t) - S_2 \sqrt{2gh(t)} \right)}} \quad (4.6)$$

V diplomové práci [17] byla provedena linearizace této výsledné nelineární diferenciální rovnice v konkrétním pracovním bodě. Pomocí této linearizace byl zjištěn celkový přenos soustavy a následně se dopočetly parametry regulátoru, které se využívají i v této práci (kapitola Regulace hladiny).

4.3 PID regulátor

V praktické části této práce se využívají dva PID regulátory. První z nich, regulátor hladiny, byl vytvořen v prostředí STEP7 firmou Ingeteam a.s. Rozkreslený PID regulátor je uveden na Obr. 20.



Obr. 20 - PID regulátor (regulace hladiny) [19]

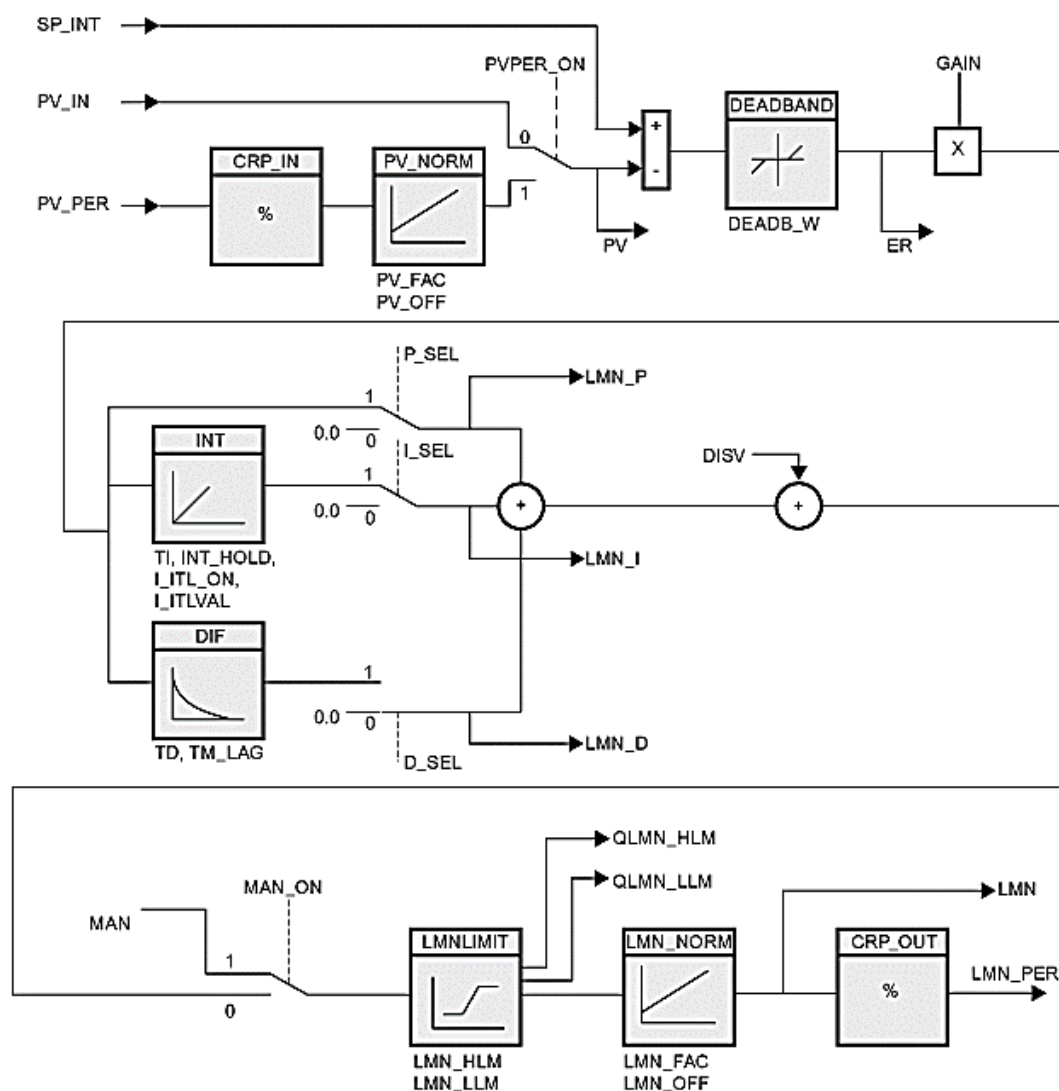
Z Obr. 20 je patrné, že funkční blok PID regulátoru obsahuje několik I/O. Nejdůležitější vstupy, které jsou stěžejní právě pro regulaci hladiny, jsou zobrazeny v Tab. 16. Tento regulátor lze dále charakterizovat jediným konkrétním výstupem (Out), tj. hodnota akčního zásahu.

Vstup	Datový typ	Komentář
SpAuto	REAL	Požadovaná hodnota výšky hladiny v nádrži
Pv	REAL	Skutečná hodnota výšky hladiny v nádrži

Tab. 16 - Vybrané vstupy regulátoru hladiny [19]

Mezi nejdůležitějšími vstupy nejsou uvedeny jednotlivé konstanty (K_p , T_i a T_d), protože se nenachází ve viditelné blokové struktuře, ale jsou obsaženy ve statických proměnných funkčního bloku daného regulátoru. Příloha I. poté obsahuje kompletní seznam vstupů.

Následuje regulátor teploty, který byl zpracován firmou Siemens a umístěn do nápovědy v softwaru TIA portal [21]. Na tento rozkreslený PID regulátor poukazuje Obr. 21.



Obr. 21 - PID regulátor (regulace teploty) [21]

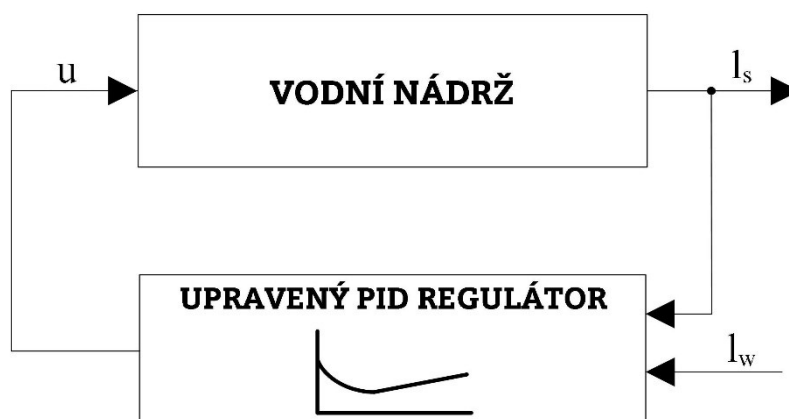
Z Obr. 21 je patrné, že funkční blok PID regulátoru obsahuje několik I/O. Nejdůležitější vstupy, které jsou stěžejní právě pro regulaci teploty, jsou uvedeny v Tab. 17. Tento regulátor lze dále charakterizovat několika výstupy, z nichž se v této práci využívá LMN, tj. hodnota akčního zásahu. Příloha I. poukazuje na kompletní seznam I/O.

Vstup	Datový typ	Komentář
SP_INT	REAL	Požadovaná hodnota výšky hladiny v nádrži
PV_IN	REAL	Skutečná hodnota výšky hladiny v nádrži
GAIN	REAL	Proporcionální zesílení
TI	TIME	Časová konstanta integrační složky
TD	TIME	Časová konstanta derivační složky

Tab. 17 - Vybrané vstupy regulátoru teploty [21]

4.4 Regulace hladiny

Na Obr. 22 je znázorněn regulační obvod, který je ovšem vhodně upraven tak, aby co nejlépe poukazoval právě na regulaci výšky hladiny v nádrži s volným odtokem. Regulátor (PLC) je tvořen vhodně upraveným regulátorem (kapitola PID regulátor), který umožňuje pomocí proporcionálního ventilu udržovat výšku vodní hladiny na požadované hodnotě.



Obr. 22 - Regulační obvod (regulace hladiny) [21]

Použité symboly:

Akční zásah ... u

Požadovaná hodnota výšky hladiny v nádrži ... l_w

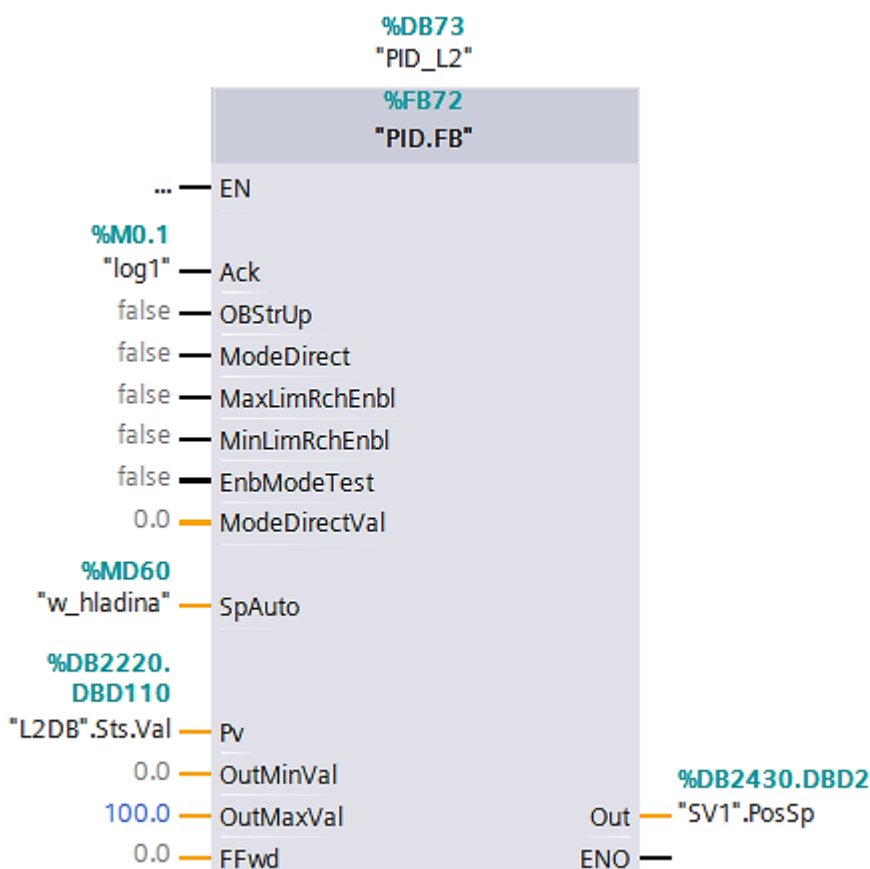
Skutečná hodnota výšky hladiny v nádrži ... l_s

Z hlediska struktury programu byl regulátor výšky hladiny umístěn do hlavního organizačního bloku (OB1). Periodu vzorkování určuje primárně délka programu, který je v daném organizačním bloku obsažen. Program mimo jiné obsahuje analogová měření všech veličin v zařízení, regulaci hladiny, teploty a k tomu přidružené funkční bloky.

Konkrétní příklad regulace výšky hladiny v softwaru TIA portal je zobrazen na Obr. 23. Z počátku je nutné nadefinovat konkrétní vstupní parametry regulátoru. Požadovanou hodnotu výšky hladiny v nádrži lze nastavit pomocí vstupu SpAuto (150 mm) a případně porovnat se skutečnou hodnotou (vstup PV). Následuje určení vhodného rozsahu hodnot akčního zásahu (otevření ventilu). K tomu slouží vstupy OutMinVal a OutMaxVal.

Pro korektní funkčnost regulátoru musí výstup Out, který je tvořen proporcionálním ventilem, vhodně reagovat na změnu regulační odchylky. Pro tento výstup jsou definovány hodnoty v intervalu 1 - 100. Na tuto skutečnost reaguje ventil otevřením v rozmezí 5 - 100 %. Dále je jistě zapotřebí, aby byly určeny konstanty proporcionální (K_p), integrační (T_i) a derivační (T_d) složky daného regulátoru. Tyto konstanty jsou převzaty z diplomové práce [17], kde bylo experimentálně rozhodnuto, že se bude jednat o PI regulátor (kapitola Matematicko - fyzikální analýza pro regulaci hladiny).

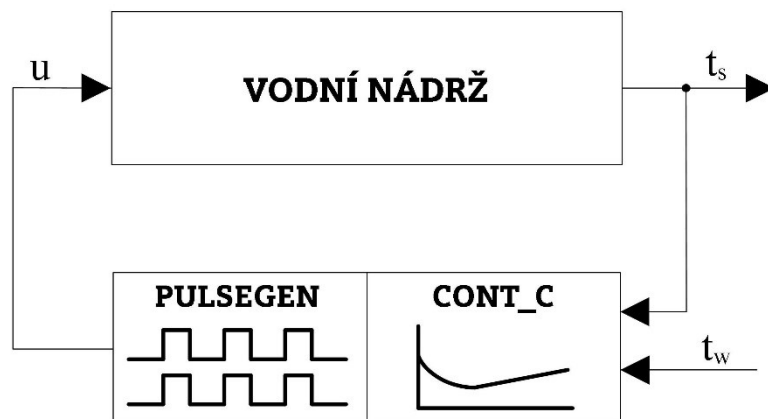
$$K_p = 8.89 \quad T_i = 42.33 \quad T_d = 0$$



Obr. 23 - PID regulátor výšky vodní hladiny v nádrži

4.5 Regulace teploty

Na Obr. 24 je znázorněn regulační obvod. Ten je ovšem upraven tak, aby co nejlépe poukazoval právě na regulaci teploty v nádrži s volným odtokem. Regulátor (PLC) je tvořen logickým spojením dvou bloků. Jedná se o PID regulátoru (CONT_C) a funkci PULSEGEN, která umožňuje vhodně spínat průtokový ohřívač a to s dostatečnou hysterezí (necitlivostí).



Obr. 24 - Regulační obvod (regulace teploty) [21]

Použité symboly:

Akční zásah ... u

Požadovaná hodnota teploty v nádrži ... t_w

Skutečná hodnota teploty v nádrži ... t_s

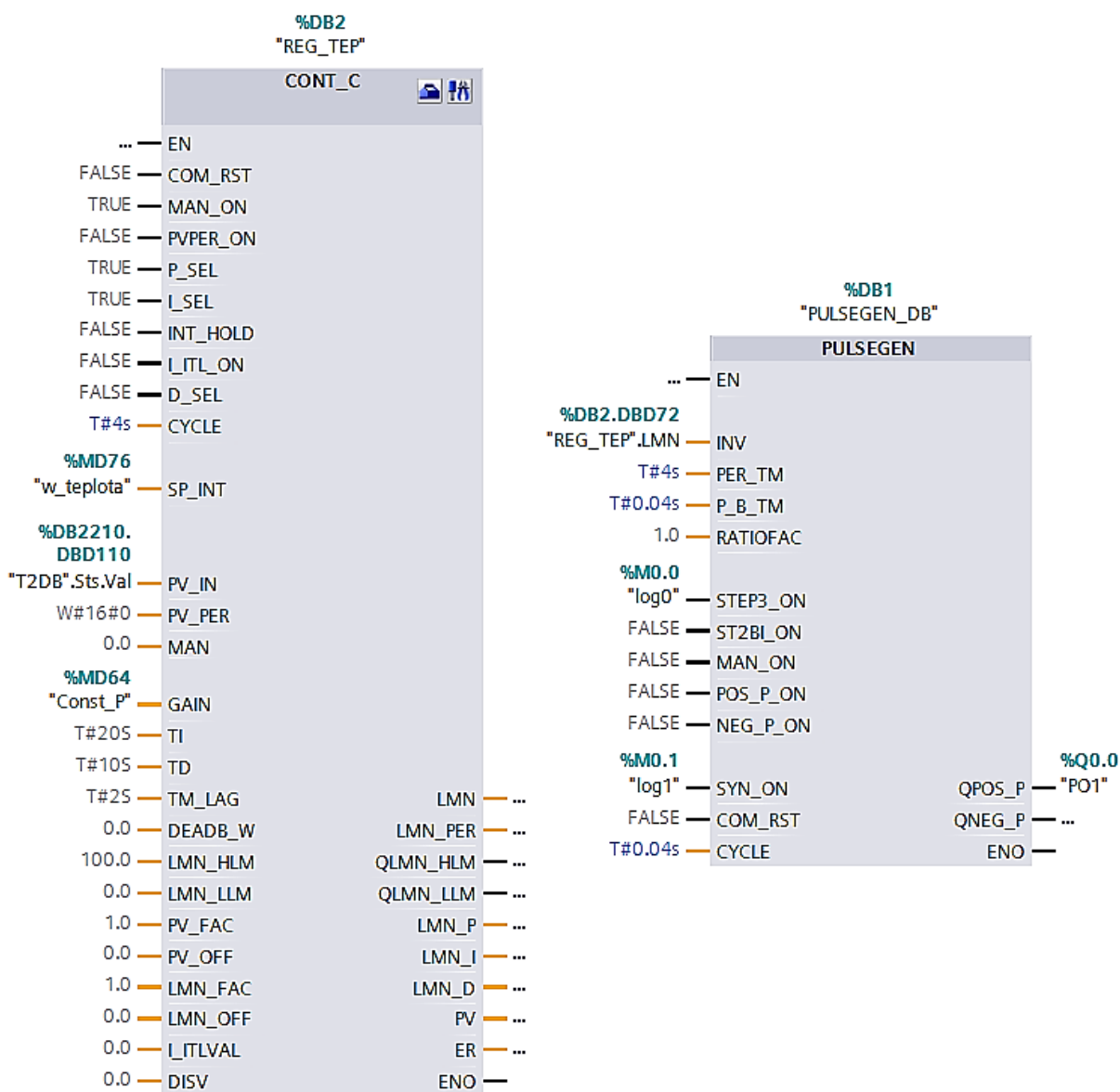
Pro správnou funkci regulátoru je nezbytné, aby byly zvoleny podmínky, za kterých bude reléový ohřívač spínat. Nejprve je zapotřebí, aby byl vstup MAN_ON, jenž slouží k potvrzení funkčnosti daného regulátoru, nastaven na hodnotu FALSE (povolení řídicí smyčky [21]). Snímač teploty je umístěn ve vzdálenosti zhruba 40 mm ode dna nádrže. Z tohoto důvodu je musí výška hladiny v nádrži překročit právě tuto mezní hodnotu. Proto byla regulace teploty realizována zároveň s regulací hladiny. Požadovaná hodnota výšky hladiny v regulované nádrži byla tedy stanovena na 150 mm (konstanty regulátoru hladiny zůstaly i pro tento případ totožné).

Následně je nutné definovat periodu vzorkování. PID regulátor byl umístěn do cyklického přerušení OB33. Toto cyklické přerušení je při regulaci voláno se 4 sekundovou periodou (CYCLE). Pro potřeby spínání je však dále nutné, aby byl k akčnímu zásahu regulátoru (LMN) připojen i prvek booleovského typu, který reprezentuje vstup funkce PULSEGEN, tj. INV (input variable). Tato funkce byla navíc vložena do cyklického přerušení OB34 (CYCLE - 0,04 sekund). Z toho je tedy zřejmé, že funkce PULSEGEN může vzorkovat 100 krát za jednu periodu (4 sekundy). Díky tomu je poté možné na výstupu této funkce spínat průtokový ohřívač (Q0.0).

Pro tuto regulaci byly experimentálně zvoleny konstanty proporcionální ($GAIN$), integrační (TI) a derivační složky (TD). Jedná se tedy o regulátor s poměrně velkým proporcionálním zesílením.

$$GAIN = 150 \quad TI = 0 \quad TD = 0$$

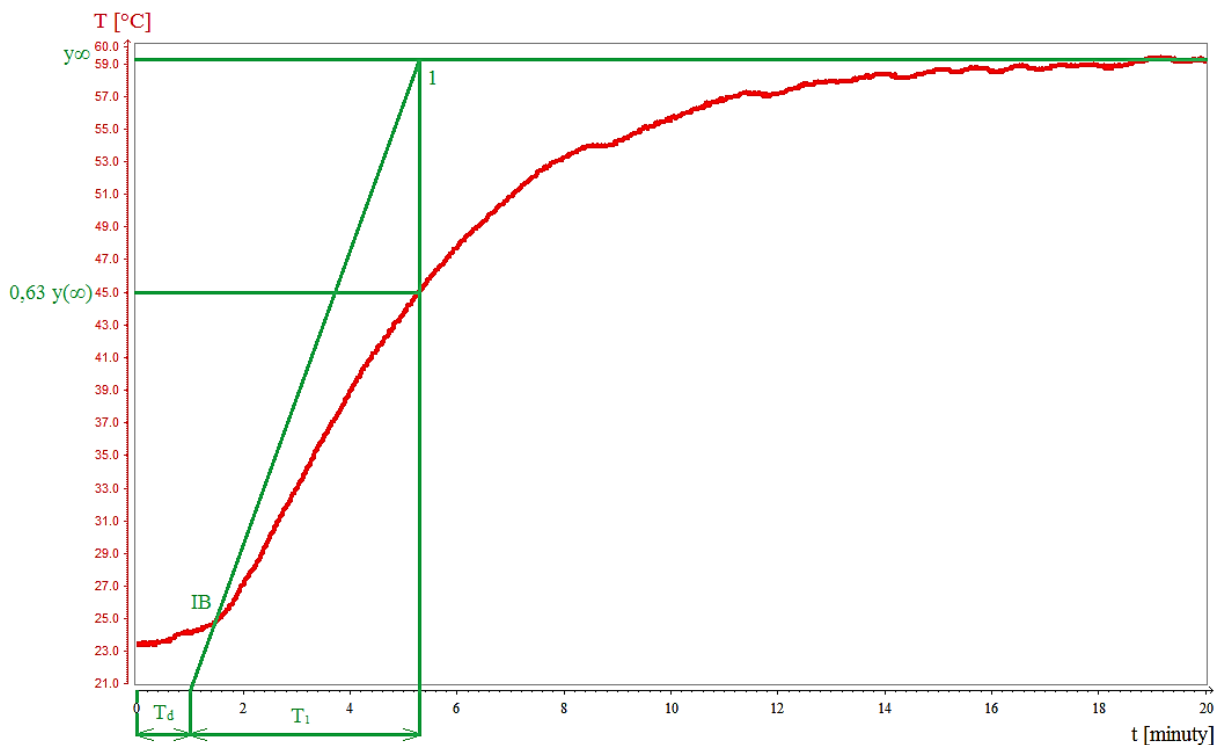
Konkrétní příklad regulace teploty je v softwaru TIA portál zobrazen na Obr. 25. Pro větší přehlednost jsou bloky regulátoru a funkce PULSEGEN umístěny vedle sebe, aby bylo dostatečně zřejmé jejich propojení.



Obr. 25 - Regulace teploty pomocí PID regulátoru a funkce PULSEGEN

4.5.1 Určení přenosu soustavy z přechodové charakteristiky

Na Obr. 26 je znázorněna přechodová charakteristika teploty vody v nádrži. Průtokový ohřívač byl schopen ohřát vodu v nádrži na maximální teplotu 59,2 °C. Byla zvolena metoda Aproximace pomocí sečny v inflexním bodě, jejíž výpočet je uveden pod charakteristikou. [20]



Obr. 26 - Přechodová charakteristika teploty

Zesílení (K) je:

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = 59,2 \quad (4.1)$$

Po určení hodnoty $0,63y(\infty)$ lze najít bod **1**, který se následně protne s Inflexním bodem (IB).

Tímto způsobem se určí potřebné dopravní zpoždění (T_D) a časová konstanta (T_I):

$$T_D = 60 \text{ s} , T_I = 186 \text{ s} \quad (4.2)$$

Přenos je následně roven:

$$G(s) = \frac{K}{T_I s + 1} e^{-T_D s} = \frac{59,2}{186s + 1} e^{-60s} \quad (4.3)$$

5. Shrnutí dosažených výsledků

V této kapitole jsou postupně shrnuty výsledky této práce. Jedná se primárně o grafické závislosti stěžejních prvků, které vhodně poukazují na oba typy regulací. Jednotlivé grafické výstupy byly vytvořeny pomocí trendů ve vizualizaci WINCC, která je popsána v následující kapitole.

5.1 Vizualizace

Vizualizace školícího zařízení „Vodní svět“ byla vytvořena v softwaru firmy Siemens, tj. Simatic WINCC 7.3. Pro korektní funkčnost všech dostupných prvků je z počátku nutné, aby byly jasné definovány všechny potřebné parametry. K tomu slouží v softwaru TIA portal tzv. Watch tabulka. Na Obr. 27 jsou vyznačeny konkrétní I/O, které se mohou nacházet právě v této tabulce.

"I_04_Q06"	%I1.0	Bool	TRUE	<input type="checkbox"/>	Průtokový ohříváč napájení OK
"I_03_PO1_Z"	%I0.3	Bool	TRUE	<input type="checkbox"/>	Vstup Průtokový ohříváče zapnuto
"PO1"	%Q0.0	Bool	TRUE	<input type="checkbox"/>	Průtokový ohříváč CHOD

Obr. 27 - Watch tabulka digitálních I/O průtokové ohříváče

K zprovoznění programové a vizualizační části této práce se využívá dvou PC. V následující Tab. 18 jsou popsány jednotlivé PC z hlediska komunikačních parametrů.

Název	Popis	Komunikace	
		IP adresa	Maska podsítě
PC_1	Komunikace s PLC	100.100.100.110	255.255.255.0
PC_2	Komunikace s PC_1	100.100.100.120	255.255.255.0

Tab. 18 - Komunikační parametry jednotlivých PC

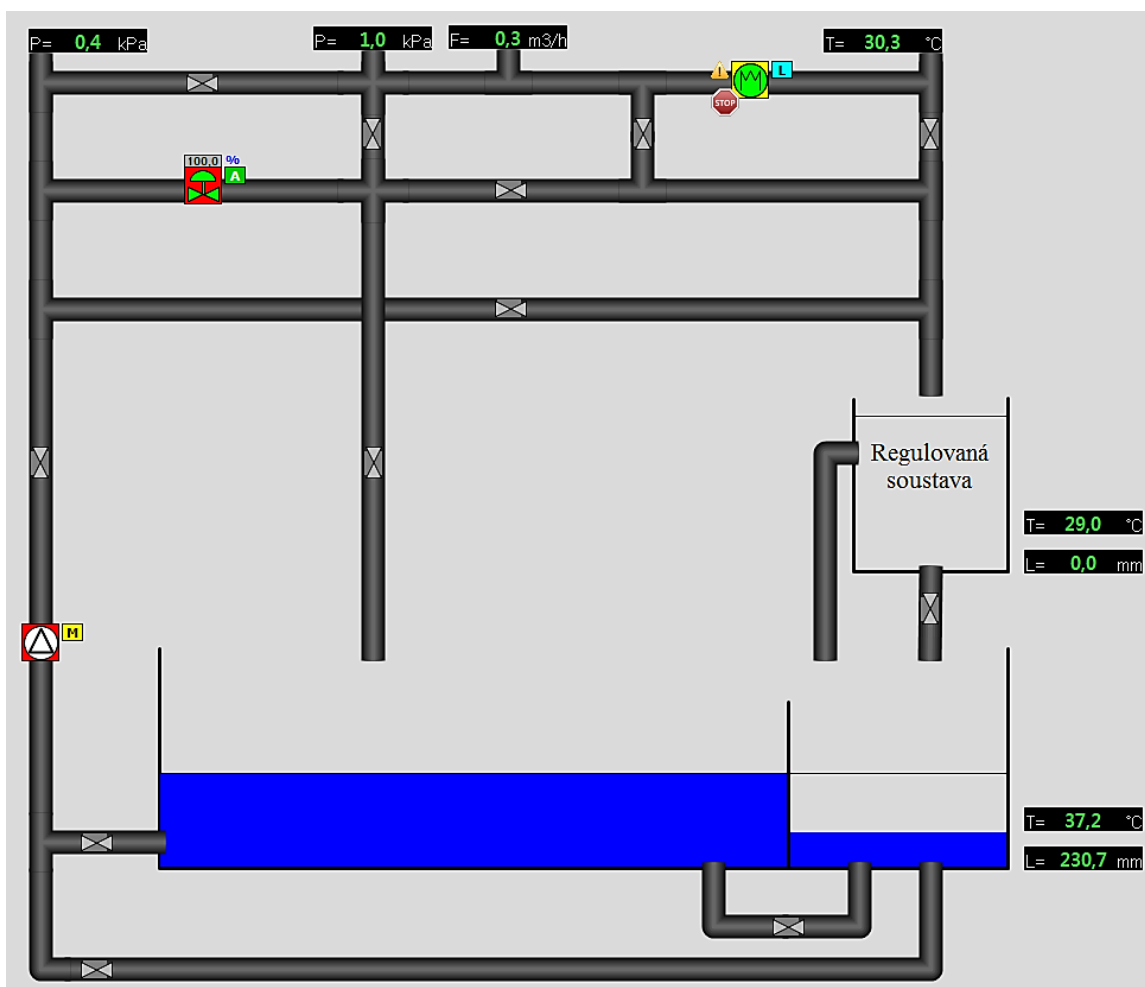
Po spuštění vizualizace (RUNTIME) je zapotřebí, aby se identifikoval uživatel, který danou vizualizaci obsluhuje. K této identifikaci slouží přihlašovací okno, jenž se nachází na Obr. 28. K tomuto projektu se lze přihlásit jako administrátor nebo operátor.

Obr. 28 - Přihlašovací okno

Každý z uživatelů je omezen určitými přístupovými právy. Z počátku se přihlásil uživatel administrator pod svým přiděleným heslem vodnisvet. Přístupová práva jsou pro tohoto uživatele samozřejmě neomezená. Následuje uživatel operator, který se může přihlásit pod heslem svetvody. Tento uživatel má však již vhodně omezená přístupová práva. Jedná se o omezení určitých standardních funkcí, mezi které patří například proces řízení (proces controlling) nebo editování jednotlivých obrázků a zpráv (Picture and Message Editing).

5.1.1 Hlavní testovací okno

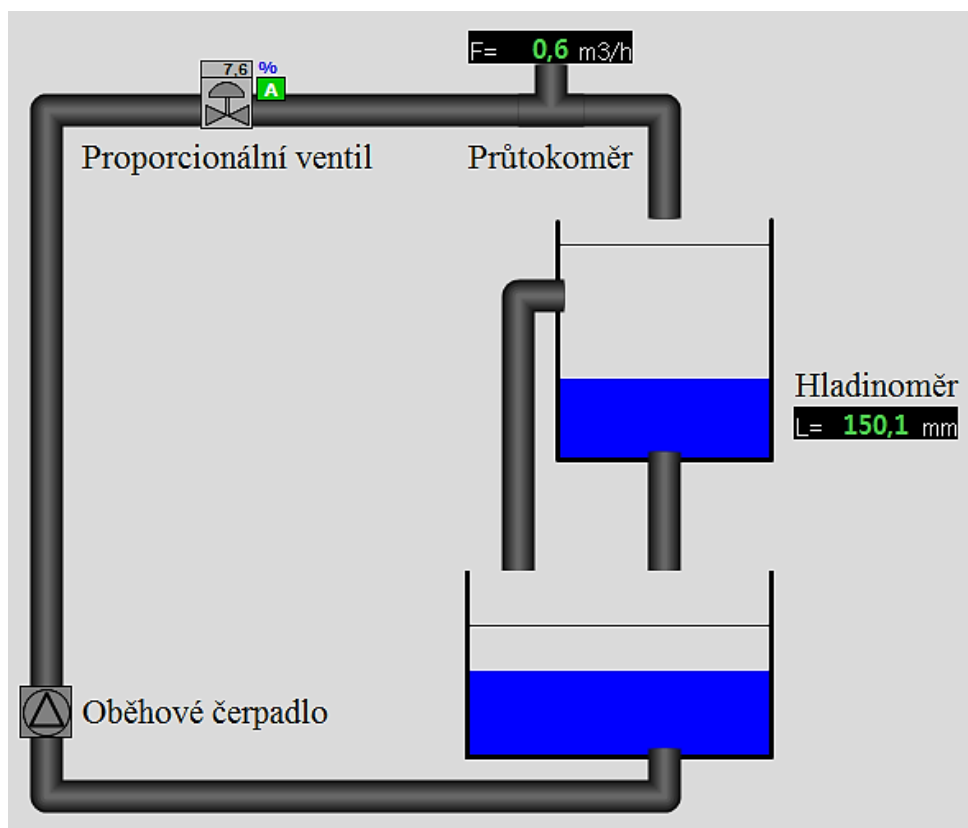
Hlavní okno, které je vyznačeno na Obr. 29, nabízí přímý pohled na celé zařízení. Všechny dostupné snímače (teploty, tlaku, průtoku, hladiny) a prvky sloužící k regulaci (oběhové čerpadlo, proporcionální ventil, průtokový ohřivač) jsou přehledně monitorovány v reálném čase. Mezi nejdůležitější části tohoto okna lze řadit nádrž s volným odtokem, ve které dochází k regulaci hladiny a teploty. Konkrétní výsledky jsou shrnuty v následujících kapitolách.



Obr. 29 - Hlavní testovací okno

5.2 Regulace hladiny

Obr. 30 poukazuje na blokové schéma, které je tvořeno regulací výšky hladiny v nádrži s volným odtokem. Regulace byla realizována v nádrži, vedle níž je umístěn hladinoměr. Požadovaná hodnota výšky hladiny byla stanovena na 150 mm.



Obr. 30 - Propojení stěžejních prvků při regulaci hladiny

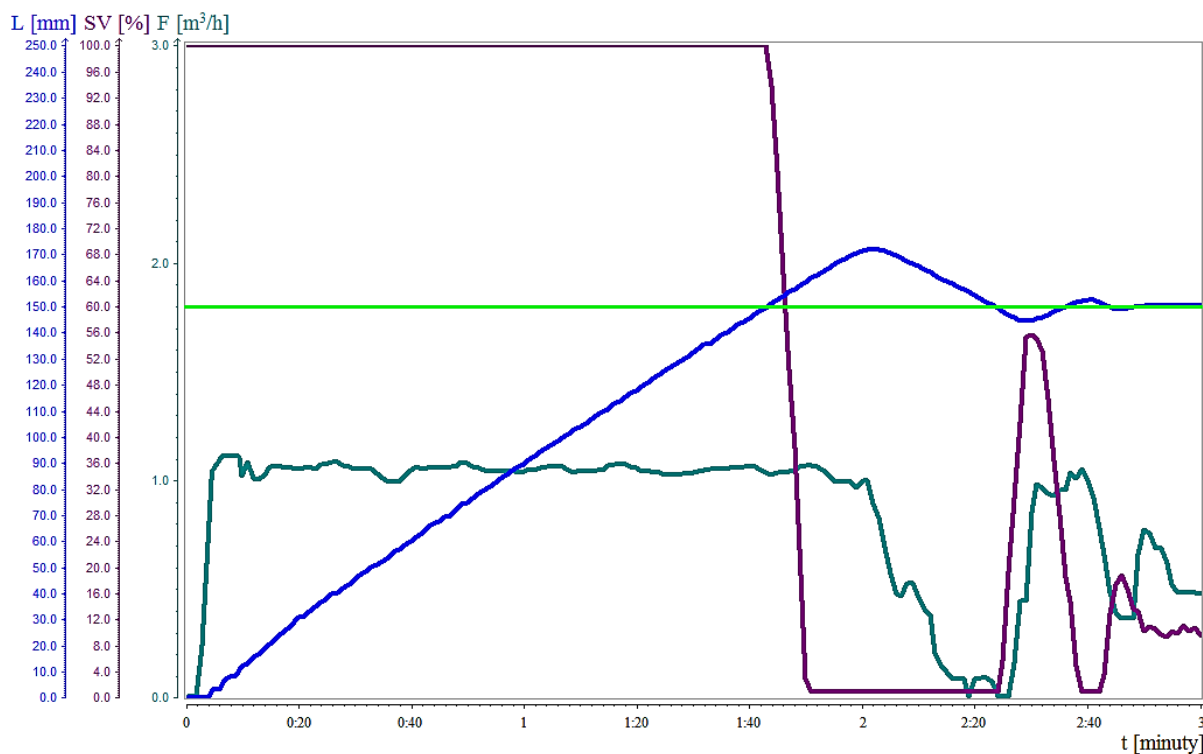
Přítomný hladinoměr indikuje výšku hladiny v nádrži, která je rovna 150,1 mm. Tato skutečnost odpovídá reálné, téměř ustálené hodnotě. Cirkulaci vody v celém zařízení zajišťuje oběhové čerpadlo, které odebírá vodu z větší spodní nádrže. Následuje proporcionální ventil, jehož otevření, které indikuje hodnotu 7,6 %, je poměrně nízké. Tato hodnota však značí, že se výška hladiny blíží ustálené hodnotě a proto je nutné, aby se ventil v této fázi otevíral v rozmezí 5 - 12%. Posledním prvkem v řadě je průtokoměr, jehož hodnota ($0,6 \text{ m}^3/\text{h}$) je klíčová pro ustálení výšky hladiny v nádrži s volným odtokem.

Pomocí několika ručních ventilů bylo experimentálně dosaženo rozsahů hodnot, jenž nabývají všechny stěžejní prvky, které slouží k regulaci výšky hladiny. Jednotlivé parametry jsou poté uvedeny v Tab. 19. Tyto rozsahy hodnot lze vyčíst z průběhu, který je znázorněn na Obr. 31.

Hlavní parametry	Hodnoty	Jednotky
Akční zásah proporcionálního ventilu	1 - 100	-
Výška hladiny	0 - 170	mm
Průtok	0 - 1,15	m ³ /h

Tab. 19 - Parametry stěžejních prvků při regulaci hladiny

Na Obr. 31 je znázorněn celkový průběh regulace hladiny (L - modrá křivka), v závislosti na čase. Po spuštění čerpadla roste výška hladiny (do 190 mm) téměř lineárně s časem (do 122 sekund). Vzhledem k tomu, že je požadovaná hodnota rovna 150 mm (světle zelená konstantní přímka), lze z průběhu odečíst dobu náběhu (přibližně 80 sekund). Překmit je roven 22 mm (přibližně 15%). Již za méně než 3 minuty (přibližně 168 sekund) lze také zpozorovat, že dochází k ustálení a to při požadované hodnotě 150 mm ($\pm 0,5$ mm).



Obr. 31 - Grafická závislost výšky hladiny, otevření proporcionálního ventilu a průtoku na čase

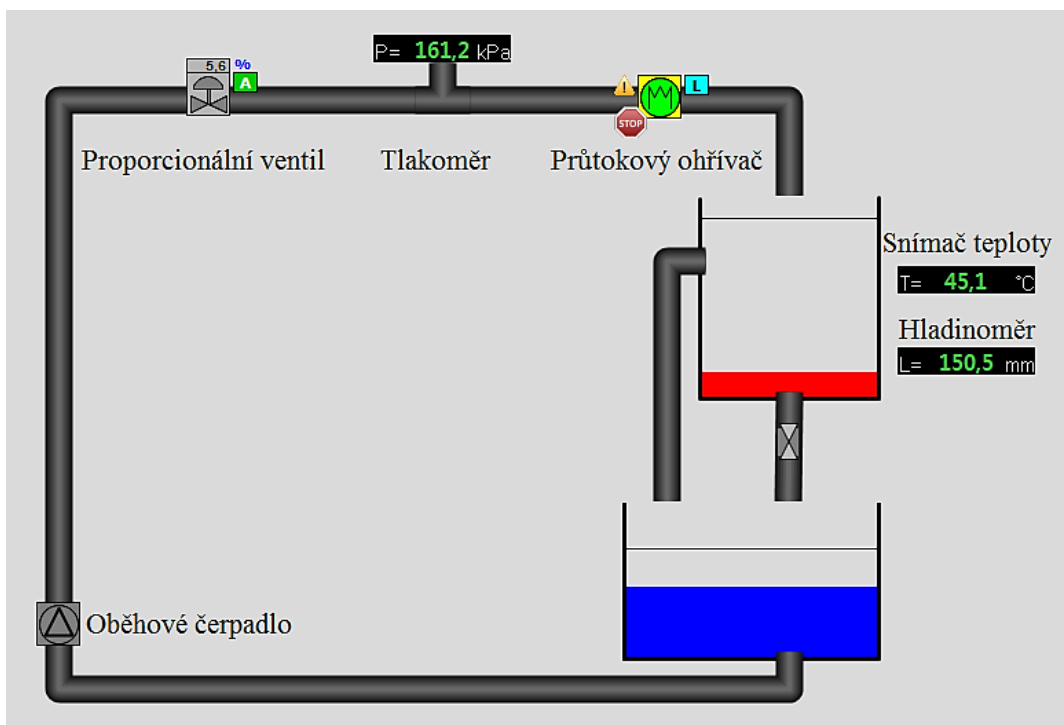
Grafická závislost regulace hladiny na čase je ovlivněna 3 hlavními faktory. První z nich se nabízí při pohledu na překmit. Jeho velikost je závislá na poměrně velkém průtoku (při 100% otevření ventilu) do nádrže. Z nádrže totiž vytéká mnohem menší průtok, jenž zajišťuje tzv. doladovací ventil (kapitola Identifikace regulované soustavy). Jako další faktor se jeví nelineární proporcionální ventil. Ten se například zavírá z maximální do minimální hodnoty až 36 sekund, a proto poměrně výrazně

zvyšuje překmit. Posledním důležitým faktorem je nelinearita soustavy, která je popsána nelineární diferenciální rovnicí (kapitola Matematicko - fyzikální analýza pro regulaci hladiny). Regulace se totiž provádí pomocí PI konstant, které jsou však linearizovány pouze v jednom pracovním bodě. Ostatní pracovní body jsou poté definovány různými přenosy soustavy.

Průběhy otevření proporcionálního ventilu (SV - fialová křivka), který charakterizuje akční zásah regulátoru a průtoku (F - tmavě zelená křivka) přehledně ukazují na regulaci hladiny. Přibližně do 104 sekund se oba průběhy vyznačují maximální hodnotou. Od zmíněného času lze pozorovat výraznější pokles hodnot jednotlivých veličin. Je to primárně způsobeno tím, že již výška hladiny dosáhla požadované hodnoty a tedy je potřeba, aby se snížil přítok vody do nádrže na minimum. To na určitou dobu zajistí větší odtok z nádrže, který odpovídá poklesu na požadovanou hodnotu. Dále je patrné, že se do přibližně 146 sekund udržují obě veličiny na minimální hodnotě. Od tohoto časového okamžiku však dochází k prvnímu poklesu pod požadovanou hodnotu. To má za následek poměrně rychlé změny obou veličin v krátkém časovém okamžiku (± 4 sekundy), které již však postupně udržují výšku hladiny v nádrži na požadované hodnotě.

5.3 Regulace teploty

Na Obr. 32 je vyznačeno blokové schéma, které je zobrazuje regulaci teploty v nádrži s volným odtokem. Regulace byla realizována v nádrži, vedle níž je umístěn hladinoměr a snímač teploty. Požadovaná hodnota teploty byla stanovena na 45 °C.



Obr. 32 - Propojení stěžejních prvků při regulaci teploty

Z přítomného hladinoměru a snímače teploty lze odečíst hodnoty 150,5 mm a 45,1 °C. Výsledek u hladinoměru odpovídá reálné ustálené hodnotě. Snímač teploty indikuje takovou ustálenou hodnotu, kterou lze odečíst pouze za určitých podmínek (například při využití vhodného chlazení).

Cirkulaci vody v celém zařízení zajišťuje oběhové čerpadlo, které odebírá vodu z větší spodní nádrže. Následuje proporcionální ventil, který je otevřen na 5,6%. Při této regulaci je kladen velký důraz na co nejnižší průtok a tím i co nejrychlejší ohřátí z počátku studené vody. Proto byl ventil, po celou dobu regulace, otevřen v rozsahu 5 - 7 %. Dalším prvkem je tlakoměr, jehož průběh je znázorněn na Obr. 33. Posledním a zároveň nejdůležitějším prvkem je v této regulaci průtokový ohřívač. Vhodným spínáním tohoto ohřívače lze ohřát vodu v nádrži na požadovanou hodnotu. Tab. 20 definuje rozsahy hodnot, jenž nabývají všechny stěžejní prvky, které slouží k regulaci teploty. Tyto jsou převzaty z průběhu, který se nachází na Obr. 33.

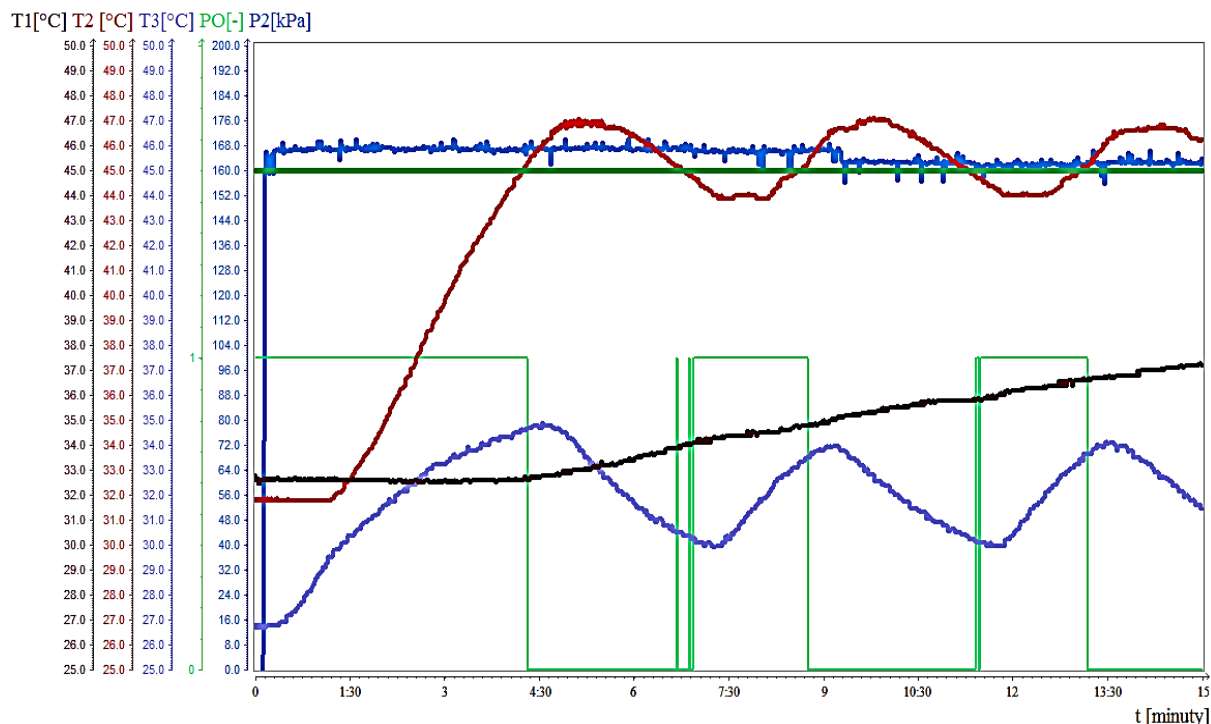
Hlavní parametry	Hodnoty	Jednotky
Otevření ventilu	5 - 7	%
Výška hladiny	150 - 152	mm
Teplota	32 - 47	°C
Tlak	0 - 170	kPa

Tab. 20 - Parametry stěžejních prvků při regulaci teploty

Obr. 33 znázorňuje celkový průběh regulace teploty T2 (červená křivka) v závislosti na čase. Po spuštění čerpadla roste teplota (do 47 °C) postupně s časem (do 5 minut). Vzhledem k tomu, že je požadovaná hodnota rovna 45 °C (tmavě zelená konstantní křivka), lze z průběhu odečíst dobu náběhu (přibližně 118 sekund). Překmit je roven 2 °C (zhruba 4,5 %). Dobu ustálení nelze z tohoto průběhu určit, protože měřená teplota neustále kmitá kolem požadované hodnoty. Tato skutečnost je způsobena několika vlivy.

Dobu ustálení jednoznačně ovlivňuje výstup průtokového ohřívače PO (světle zelený diskretní signál), jenž je řízen PWM regulací a spínán ve dvou mezních polohách, tj. 0 a 1 (Topí a Netopí). Z průběhu je zřejmé, že při vypnutí průtokového ohřívače stále roste regulovaná teplota T2 (například od časového okamžiku 4:21) až do 47 °C. Hlavní podíl na tomto růstu má setrvačnost soustavy.

Mezi další omezení celé regulace teploty lze řadit absenci chlazení. Vhodně zvolený chladicí prvek by byl schopen výrazně zlepšit průběh této regulace. Průtokový ohřívač se totiž při růstu teploty (nad požadovanou teplotu) přepne do mezní polohy, tj. netopí. Díky neustálému proudění vody do nádrže (po určitém čase se zahřeje i cirkulující voda) se však nestihne hladina ochladit tak, aby teplota klesala v podstatě hned po překročení požadované hodnoty. Z počátku trvá tato forma ochlazení na požadovanou hodnotu až 2,5 minuty.



Obr. 33 - Grafická závislost teploty na čase

Z Obr. 33 je dále zřejmé, jak se postupně mění všechny změřené teploty. Jedná se o teplotu $T3$ (světle fialová křivka), regulovanou teplotu $T2$ (červená křivka) a teplotu $T1$, jenž je umístěna ve spodní nádrži a určena pro čerpání. Tato teplota se však roste velice pomalu a to hlavně díky tomu, že obsahuje velké množství vody (několik stovek litrů). Teploty $T2$ a $T3$ jsou však mnohem více závislé na spínání průtokového ohřívače (PO). Rychlejší nárůst a pokles teplot $T3$ vůči $T2$ je dán umístěním čidla, které je, v případě $T3$, umístěno hned vedle průtokového ohřívače. Tento rychlejší nárůst (pokles) je poměrně jednoznačně vidět i u spínání PO (například v čase 4:20).

Veličina, která úzce souvisí se spínáním průtokového ohřívače, je tlak $P2$ (tmavě modrá křivka). Průtokový ohřívač obsahuje tzv. spínač diferenčního tlaku, který se, dle kapitoly Průtokový ohřívač CLAGE, sepne při hodnotě 50 kPa. Při bližším pohledu na průběh, jenž je znázorněn na Obr. 33, je zřejmé, že se tak stane zhruba za 9s od sepnutí oběhového čerpadla. Ve zbývajícím čase se tlak mění v rozmezí 155 - 170 kPa.

6. Závěr

Hlavním úkolem této práce je ověření možností regulace výšky hladiny a teploty v nádrži s volným odtokem. Tato nádrž je součástí školícího zařízení „Vodní svět“, jenž se nachází ve firmě Ingeteam a.s a které slouží k experimentování v oblasti řízení a regulace.

Prvek, který zprostředkovává regulaci, je programovatelný logický automat (PLC). Pro účely regulace jsem zpracoval dva regulátory. Nejprve bylo nutné zprovoznit regulaci hladiny, která poté běžela souběžně s regulací teploty.

K regulaci hladiny jsem využil regulátor, jenž byl vytvořen, v prostředí STEP7, firmou Ingeteam a.s. Regulátor obsahuje jediný výstup (out), tj. akční zásah. Ten je tvořen spojitou hodnotou (1 - 100), která otevírá proporcionální ventil v rozsahu (5 - 100 %) a umístěn v cyklu main (OB1). Perioda vzorkování zde závisí na konkrétním programu, jenž je v daném cyklu umístěn. Pro korektní regulaci byly experimentálně určeny konstanty regulátoru a to za pomoci linearizace v dané pracovním bodě. V tomto případě se jedná o PI regulátor. Hlavním cílem této regulace je ustálení výšky hladiny na požadované hodnotě (150 mm). V kapitole Shrnutí dosažených výsledků lze nalézt grafický průběh výšky hladiny v nádrži v závislosti na čase. Z tohoto průběhu je patrné, že se výška hladiny ustálí na požadované hodnotě s maximální odchylkou $\pm 0,5$ mm. V jednom grafu jsou navíc doplněny i průběhy akčního zásahu (otevření proporcionálního ventilu) a průtoku. Průběh regulace nepříznivě ovlivňuje nelinearita a to jak soustavy, tak i samotného proporcionálního ventilu.

Následně jsem kompletně zpracoval regulátor, jenž zajišťuje v nádrži s volným odtokem regulaci teploty. Tuto regulaci tvoří logické spojení dvou bloků v softwaru TIA portal. Jedná se o blok regulátoru CONT_C (cyklus 4 sekundy) a funkci PULSEGEN (cyklus 0,04 sekund), která již slouží ke spínání průtokového ohříváče (PO), který může při tomto nastavení spínat až 100 krát za 4 sekundy. Regulátor obsahuje výstup (LMN), tj. spojitá hodnota akčního zásahu. Tuto hodnotu vhodně převezme funkce PULSEGEN, která již poté spíná průtokový ohříváč. Pro korektní regulaci je dále nutné, aby byly nastaveny konstanty regulátoru. Experimentálně bylo určeno, že se bude jednat o regulátor P s poměrně velkým zesílením. Regulace teploty probíhá za předpokladu, že je z počátku spuštěna regulace výšky hladiny. Nejprve se tedy reguluje výška hladiny v nádrži (požadovaná hodnota - 150 mm) a poté se spustí regulace teploty (požadovaná hodnota - 45°C). V kapitole Shrnutí dosažených výsledků lze nalézt grafické průběhy teploty hladiny v nádrži v závislosti na čase. V této charakteristice jsou také obsaženy průběhy zbývajících teplotních čidel (T1 a T3), které jsou doplněny o akční zásah (výstup PO) a tlak. U této soustavy neustále kmitá skutečná teplota kolem požadované, protože při nesepnutém PO není možné nijak uchlazení teplotu vody. Zároveň ovlivňuje kvalitu regulace i setrvačnost soustavy, která se projevuje růstem regulované teploty (při nesepnutém PO).

V této práci je uvedena také vizualizace, kterou byla vytvořena v softwaru Simatic WINCC. Tato vizualizace přehledně indikuje hodnoty všech prvků, které jsou dostupné v zařízení „Vodní svět“.

Literatura

- [1] ŠULC, Bohumil. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 333 s. ISBN 80-010-3007-5.
- [2] BALÁTEĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 663 s. ISBN 80-730-0020-2.
- [3] Pulzně šířková regulace. 2015. *DH servis* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/psm.htm>
- [4] NĚMEC, Mojmír. INGETEAM, a.s. *Dokumentace ke školicímu zařízení „Vodní svět“*. EKOMOR, s.r.o, 29. 5. 2011.
- [5] Čerpadlo Pedrollo CP130. In: *Siwatec, a.s* [online]. [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: <http://www.siwatec.cz/dokumenty/Prospekty%20%C4%8Derpadel%20PEDROLLO/Odst%C5%99ediv%C3%A1%20%C4%8Derpadla%20CP.pdf>
- [6] Průtokový ohřívač CLAGE. In: *CLAGE* [online]. © 2015 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: <http://clage.cz/tlakove-prutokove-ohrivace-vody/10-cbh-7-1-1-prutokovy-ohrivac-tlakovy-pro-jedno-az-dve-odberova-mista.html>
- [7] Indukční průtokoměr FLONET. In: *Elis Plzeň a.s* [online]. [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: <http://www.elis.cz/cs/produkty/indukcni-prutokomer-kapalin/indukcni-prutokomery-flonetfn20xx1.html>
- [8] Odporové snímače teploty T1005. In: *JSP Měření a regulace* [online]. © 1993-2014 [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: <http://www.jsp.cz/files/c0296kpcz.pdf>
- [9] Snímače relativního a absolutního tlaku s keramickou membránou. In: *JSP Měření a regulace* [online]. © 1993-2014 [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: <http://www.jsp.cz/files/d1134npcz.pdf>
- [10] Snímače tlaku LMK 351. In: *BD Sensors* [online]. 2015 [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: http://www.bdsensors.cz/fileadmin/user_upload/Download/Datenblaetter_datasheets/LMK351_CS.pdf
- [11] Elektrické pohony SQX62. In: *Siemens* [online]. 2005 [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/30905_CM1N4554cz.pdf
- [12] L. A. BRYAN, L. A. E. *Programmable controllers: theory and implementation*. 2nd ed. Homewood, Ill: American Technical Pub, 2002. ISBN 08-269-1300-8.
- [13] Simatic CP5611. In: *Siemens* [online]. © 1996-2014 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: <http://w3.siemens.com/mcms/industrial-communication/en/profibus/system-connections-pg-pc/cp5611/pages/cp5611a2.aspx>
- [14] SIMATIC ET 200S. In: *Siemens* [online]. © 1996-2014 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://w3.siemens.com/mcms/distributed-io/en/ip20-systems/et200s/pages/default.aspx>
- [15] Decentrální periferie SIMATIC ET 200S. In: *Siemens ČR* [online]. © 2014 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://stest1.etnetera.cz/ad/current/index.php?ctxnh=4f9d53c2c6>
- [16] Sběrníkový systém PROFIBUS. In: *Siemens* [online]. © 2015 [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://stest1.etnetera.cz/ad/current/index.php?ctxnh=cf23b3a6ff>

- [17] HORÁČEK, Ondřej. *Návrh a implementace řídicích algoritmů s PID regulátory na reálném laboratorním modelu s uvažováním nelinearit systému*. VŠB - TUO, 7. 5. 2013. Bakalářská práce. VŠB - TUO. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
- [18] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999, 276 s. ISBN 80-722-5030-2.
- [19] INGETEAM, a.s. *Dokumentace k PID regulátoru*.
- [20] Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik. *Učební text - Katedra 352* [online]. Dostupné také z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm#ma1
- [21] SIEMENS. *Help (návod) - TIA Portal V12*. 2012.

Seznam příloh

- Příloha I. Kompletní seznam I/O funkčního bloku PID regulátoru**
- Příloha II. Struktura přiloženého CD**

Příloha I - Seznam I/O funkčního bloku PID regulátoru

a) PID regulátor firmy Ingeteam a.s

Vstup	Datový typ	Komentář
Ack	BOOL	Potvrzení poruchy
OBStrUp	BOOL	Startovací cyklus PLC
ModeDirect	BOOL	Požadavek na mód direct
MaxLimRchEnbl	BOOL	Upozornění na dosažení maximální hodnoty
MinLimRchEnbl	BOOL	Upozornění na dosažení minimální hodnoty
EnbModeTest	BOOL	Požadavek na mód test
ModeDirectVal	BOOL	Hodnota akčního zásahu v módu direct
SpAuto	REAL	Požadovaná hodnota výšky hladiny v nádrži
Pv	REAL	Skutečná hodnota výšky hladiny v nádrži
OutMinVal	REAL	Minimální hodnota akčního zásahu
OutMaxVal	REAL	Maximální hodnota akčního zásahu
FFwd	REAL	Hodnota dopředné vazby

Kompletní seznam vstupů PID regulátoru

Tento PID regulátor obsahuje jediný výstup (out), tj. hodnota akčního zásahu.

b) PID regulátor firmy Siemens

Vstup	Datový typ	Komentář
COM_RST	BOOL	Inicializační vstup
MAN_ON	BOOL	Potvrzení funkčnosti (povolení řídicí smyčky)
PVPER_ON	BOOL	Povolení skutečné hodnoty „I/Os“
P_SEL	BOOL	Povolení P - action
I_SEL	BOOL	Povolení I - action
INT_HOLD	BOOL	Udržení I - action
L_ITL_ON	BOOL	Určení I - action
D_SEL	BOOL	Povolení D - action
CYCLE	TIME	Vzorkovací čas
SP_INT	REAL	Požadovaná hodnota výšky hladiny v nádrži
PV_IN	REAL	Skutečná hodnota výšky hladiny v nádrži

PV_PER	WORD	Skutečná hodnota I/O
MAN	REAL	Manuální hodnota
GAIN	REAL	Proporcionální zesílení
TI	TIME	Časová konstanta integrační složky
TD	TIME	Časová konstanta derivační složky
TM_LAG	TIME	Časové zpoždění D - složky
DEADB_W	REAL	Určení pásma necitlivosti
LMN_HLM	REAL	Maximální hodnota akčního zásahu
LMN_LLM	REAL	Minimální hodnota akčního zásahu
PV_FAC	REAL	Faktor skutečné hodnoty
PV_OFF	REAL	Offset skutečné hodnoty
LMN_FAC	REAL	Faktor akčního zásahu
LMN_OFF	REAL	Offset akčního zásahu
I_ITLVAL	REAL	Inicializační hodnota I - action
DISV	REAL	Řízení dopředné vazby

Kompletní seznam vstupů PID regulátoru

Vstup	Datový typ	Komentář
LMN	REAL	Akční zásah
LMN_PER	WORD	Akční zásah I/O
QLMN_HLM	BOOL	Indikace dosažení maximální hodnoty akčního zásahu
QLMN_LLM	BOOL	Indikace dosažení minimální hodnoty akčního zásahu
LMN_P	REAL	Akční zásah P - action
LMN_I	REAL	Akční zásah I - action
LMN_D	REAL	Akční zásah D - action
PV	REAL	Skutečná hodnota
ER	REAL	Indikace chyby

Kompletní seznam výstupů PID regulátoru

Příloha II - Struktura přiloženého CD

- a) Textová část BP ve formátu PDF**
- b) Programová část v softwaru TIA Portal V12**
- c) Vizualizační část v softwaru Simatic WINCC 7.3**
- d) Doplnující obrázky a fotografie**